



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação**  
**Departamento de Sistemas de Energia Elétrica**

## **Obtenção da Margem Mínima de Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência**

**Autor: Duvier Rolando Bedoya Bedoya**

**Orientadores: Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Junior**  
**Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva**

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de mestre em engenharia elétrica.

### **Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Junior	<b>FEEC/UNICAMP</b>
Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi	<b>FEIS/UNESP</b>
Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota	<b>PUC-Campinas</b>
Prof. Dr. Vivaldo Fernando da Costa	<b>FEEC/UNICAMP</b>

Campinas, Agosto 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B39o Bedoya Bedoya, Duvier Rolando  
Obtenção da margem mínima de estabilidade de tensão  
de sistemas elétricos de potência. / Duvier Rolando Bedoya  
Bedoya. – Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientadores: Carlos Alberto de Castro Junior, Luiz  
Carlos Pereira da Silva

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de segurança. 2. Controle em tempo real 3.  
Sistemas de energia elétrica - Estabilidade. 4. Programação  
não-linear. 5. Controle preditivo. I. Castro Junior, Carlos  
Alberto de. II. Silva, Luiz Carlos Pereira da.  
III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Título em Inglês: Computation of voltage stability margins of power systems

Palavras-chave em Inglês: Power system security, voltage stability, real time operation,  
voltage stability margin, voltage profile, preventive control

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Carlos Roberto Minussi, Alexandre de Assis Mota, e Carlos  
Alberto Favarin Murari

Data da defesa: 10/08/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidato:** Duvier Rolando Bedoya Bedoya

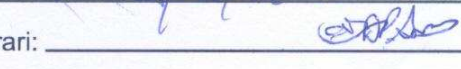
**Data da Defesa:** 10 de agosto de 2007

**Título da Tese:** "Obtenção da Margem Mínima de Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência"

Prof. Dr. Carlos Alberto de Castro Júnior (Presidente): 

Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi: 

Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota: 

Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari: 

*Ao meu pai, **in memoriam**, embora não esteja conosco o levarei sempre para onde for*

*À minha família na Colômbia e às pessoas que sempre acreditaram em mim*

*A toda a gente querida na Colômbia, amigos, colegas*

*A toda a gente querida no Brasil, amigos, colegas*

*À Universidad Nacional de Colombia pela sua qualidade*

*À UNICAMP pela sua qualidade e pela oportunidade, especialmente ao Professor Castro*

*Ao povo Brasileiro pela sua valiosa e rica cultura*

## **Agradecimentos**

Ao Professor Carlos A. Castro, sou grato pela orientação.

Ao Prof. Luiz Carlos Pereira da Silva pelas discussões e ajuda conjunta na melhora do trabalho.

Aos colegas do DSEE.

Aos meus amigos e pessoas queridas do Brasil e da Colômbia.

À minha família.

À FAPESP e CNPq, pelo apoio financeiro.

À UNICAMP.

À UNAL (Universidad Nacional de Colombia-Manizales).

## Resumo

Este trabalho apresenta uma nova e rápida metodologia para calcular a margem mínima de estabilidade de tensão de sistemas de potência. O cálculo da margem de estabilidade de tensão (MET) é normalmente requerido no planejamento e operação dos sistemas de potência. Usualmente, a carga é incrementada em uma direção predefinida baseada em históricos ou previsão da demanda (por exemplo, com fator de potência constante, seguido por um incremento proporcional nos MW da geração) até que o ponto de máximo carregamento (PMC) seja obtido. O cálculo da margem mínima METm, permite obter a pior direção de incremento de carga. Além disso, podem-se apresentar situações onde incrementos de carga imprevistos em uma barra ou área conduzam a uma margem menor, arriscando a operação do sistema em modo seguro. O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia nova e eficiente, do ponto de vista computacional, para obter a METm e a correspondente direção que é equivalente à pior direção de incremento de carga. Esta informação, com a margem que usualmente é calculada, permite que os operadores do sistema tomem medidas preventivas de controle para retornar ou manter o sistema em modo de operação seguro. Adicionalmente, é apresentado um estudo de áreas críticas para identificar as regiões ou barras que mais estão contribuindo à perda de estabilidade de tensão. É possível encontrar a melhor ação de controle, como corte de carga ou compensação reativa.

## Abstract

This work presents a new and fast method for computing the minimum voltage stability margin of electric power systems. The computation of the voltage stability margin (VSM) is often required for the planning and operation of power systems. Usually, loads are increased along a predefined direction, which can be estimated based on historical data or load forecast (e.g. with constant power factor, followed by a proportional MW generation increase) up to the system's maximum loading point is reached. The computation of the minimum VSM (*mVSM*) allows obtaining the load increase worst scenario. Also, situations may occur where variations from the predefined load increase direction, as for example, an unexpected load increase at some bus or area, may result in smaller VSM, taking the system to an insecure operating state. The aim of this work is to propose a new and fast method to compute the *mVSM* and the corresponding load increase direction for which it occurs. This information, along with the usual VSM, allows operators to take measures like preventive control actions to move the system to securer operating points. Also a general study of critical areas is shown in order to identify the weakest region and bus that are contributing to the loss of voltage stability. It is possible to find the best control actions, like load curtailment or reactive compensation.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Estabilidade de sistemas elétricos de potência</b>	<b>3</b>
2.1	Estabilidade de curto, médio e longo prazos . . . . .	4
2.2	Estabilidade de ângulo do rotor . . . . .	5
2.3	Estabilidade de tensão . . . . .	5
2.4	Técnicas de análise de estabilidade de tensão . . . . .	7
2.5	Margem de estabilidade de tensão e margem mínima de estabilidade de tensão . . .	8
2.6	Abordagem estática do fluxo de carga . . . . .	9
2.7	Comparação entre o espaço em parâmetros de carga e a curva PV . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Cálculo do ponto de máximo carregamento de sistemas elétricos de potência</b>	<b>13</b>
3.1	Modelo de fluxo de carga modificado . . . . .	13
3.2	Fluxo de carga com otimização de passo . . . . .	14
3.3	Cálculo do PMC usando técnicas de otimização . . . . .	14
3.3.1	Introdução . . . . .	14
3.3.2	Determinação de incrementos de carga . . . . .	15
3.3.3	Corte de carga . . . . .	16
3.3.4	Corte de carga simplificado . . . . .	18
3.4	Resultados . . . . .	19
3.4.1	Cálculo do PMC para $\alpha=\beta=1$ . . . . .	19
3.4.2	Influência da direção de incremento de carga: fator de potência constante, vetor unitário . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Obtenção da margem mínima de estabilidade de tensão</b>	<b>26</b>
4.1	Metodologia proposta na literatura para obter a margem mínima de estabilidade de tensão . . . . .	26

4.2	Definição da direção inicial de incremento de carga . . . . .	27
4.3	Obtenção da margem mínima: idéia geral . . . . .	28
4.4	Controle do passo para cada incremento de carga . . . . .	33
4.5	Algoritmo básico . . . . .	34
4.6	Resultados . . . . .	34
4.6.1	Margem mínima . . . . .	34
4.6.2	Diferentes valores de $\alpha_k$ e $\beta_k$ . . . . .	35
4.6.3	Limitando o tamanho do passo de incremento de carga $\Delta\lambda$ . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Novos métodos para obter a margem mínima de estabilidade de tensão</b>	<b>40</b>
5.1	Método A - descrição geral . . . . .	40
5.2	Resultados . . . . .	42
5.3	Método B - descrição geral . . . . .	45
5.4	Resultados . . . . .	47
5.4.1	Obtenção da METm com $\alpha, \beta = \omega$ . . . . .	47
5.4.2	Comparação entre métodos para obter o PMC e a MET . . . . .	48
5.4.3	Comparação entre métodos para obter METm . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Determinação das áreas críticas com relação à estabilidade de tensão</b>	<b>51</b>
6.1	Fatores de participação: aspectos gerais . . . . .	51
6.2	Resultados . . . . .	52
6.2.1	Fatores de participação e áreas congestionadas . . . . .	52
6.2.2	Análise de contingências . . . . .	57
<b>7</b>	<b>Pesquisas adicionais</b>	<b>62</b>
7.1	Obtenção da margem mínima . . . . .	63
7.2	Cálculo da margem mínima usando sensibilidades . . . . .	64
7.3	Análise de sensibilidades em diferentes pontos de operação . . . . .	66
7.4	Probabilidade de ocorrência do colapso de tensão . . . . .	71
<b>8</b>	<b>Conclusões e considerações finais</b>	<b>73</b>
8.1	Conclusões . . . . .	73
8.2	Considerações finais . . . . .	74
<b>A</b>	<b>Publicações resultantes do trabalho de pesquisa</b>	<b>77</b>



# Lista de Figuras

2.1	Espaço em parâmetros de carga . . . . .	10
2.2	Aproveitamento do autovetor esquerdo . . . . .	11
2.3	Espaço de parâmetros de carga . . . . .	12
2.4	Curva PV . . . . .	12
3.1	Incremento do fator de carga $\lambda$ para encontrar o PMC . . . . .	15
3.2	Corte de carga no caso de situações infactíveis . . . . .	17
3.3	PMC - sistema de 2 barras . . . . .	20
3.4	PMC - sistema de IEEE 14 barras . . . . .	20
3.5	PMC - sistema IEEE 30 barras . . . . .	21
3.6	PMC - sistema IEEE 57 barras . . . . .	21
3.7	PMC - sistema IEEE 300 barras . . . . .	22
3.8	PMC - sistema 1081 barras . . . . .	22
3.9	PMC - sistema de 2 barras . . . . .	23
3.10	PMC - sistema IEEE 14 barras . . . . .	23
3.11	PMC - sistema IEEE 30 barras . . . . .	24
3.12	PMC - sistema IEEE 57 barras . . . . .	24
3.13	PMC - sistema IEEE 300 barras . . . . .	25
3.14	PMC - sistema 1081 barras . . . . .	25
4.1	Obtenção da margem mínima de estabilidade de tensão . . . . .	27
4.2	Caso A: procedimento para fator de potência constante . . . . .	28
4.3	Case B: procedimento adotado em [16] . . . . .	28
4.4	Local e global METm . . . . .	29
4.5	Rede de 2 barras . . . . .	30
4.6	Espaço de parâmetros de carga para a rede de 2 barras . . . . .	30

4.7	Obtenção da margem mínima . . . . .	32
4.8	Margem mínima - sistema de 2 barras . . . . .	38
4.9	Margem mínima - sistema IEEE 14 barras . . . . .	38
4.10	Margem mínima - sistema IEEE 300 barras . . . . .	39
5.1	Obtenção da margem mínima - método A . . . . .	41
5.2	Obtenção da margem mínima - método B . . . . .	46
5.3	Obtenção da margem mínima para os sistemas de 14 e 300 barras . . . . .	47
6.1	Sistema IEEE 14 barras: $FPA$ . . . . .	53
6.2	Sistema IEEE 14 barras: $FPR$ . . . . .	53
6.3	Sistema IEEE 30 barras: $FPA$ . . . . .	54
6.4	Sistema IEEE 30 barras: $FPR$ . . . . .	54
6.5	Sistema IEEE 57 barras: $FPA$ . . . . .	55
6.6	Sistema IEEE 57 barras: $FPR$ . . . . .	56
6.7	Sistema IEEE 14 barras, área e barras críticas . . . . .	57
6.8	Sistema IEEE 30 barras, área e barras críticas . . . . .	58
6.9	Sistema IEEE 30 barras, $FPA$ no cenário pós-contingência na direção da METm . .	60
6.10	Sistema IEEE 30 barras, $FPR$ no cenário pós-contingência na direção da METm . .	60
6.11	Sistema IEEE 30 barras: diferentes margens . . . . .	61
6.12	Sistema IEEE 14 barras: diferentes margens . . . . .	61
7.1	Margem mínima usando sensibilidades . . . . .	64
7.2	$H'kk$ CB (1)- 14 barras . . . . .	67
7.3	$L'kk$ CB (1)- 14 Barras . . . . .	67
7.4	$H'kk$ PMC (2) - 14 barras . . . . .	67
7.5	$L'kk$ PMC (2) - 14 Barras . . . . .	67
7.6	$H'kk$ PMC (3) - 14 barras . . . . .	67
7.7	$L'kk$ PMC (3) - 14 Barras . . . . .	67
7.8	$H'kk$ PMC (5) - 14 barras . . . . .	68
7.9	$L'kk$ PMC (5) - 14 Barras . . . . .	68
7.10	$H'kk$ CB (1) - 300 barras . . . . .	68
7.11	$L'kk$ CB (1) - 300 Barras . . . . .	68
7.12	$H'kk$ PMC (2) - 300 barras . . . . .	68

7.13	$L'kk$ PMC (2) - 300 Barras . . . . .	68
7.14	$H'kk$ PMC (3) - 300 barras . . . . .	69
7.15	$L'kk$ PMC (3) - 300 Barras . . . . .	69
7.16	$H'kk$ PMC (5) - 300 barras . . . . .	69
7.17	$L'kk$ PMC (5) - 300 Barras . . . . .	69
7.18	$H'kk$ CB (1) - Sistema Peruano . . . . .	70
7.19	$L'kk$ CB (1) - Sistema Peruano . . . . .	70
7.20	$H'kk$ PMC (2) - Sistema Peruano . . . . .	70
7.21	$L'kk$ PMC (2) - Sistema Peruano . . . . .	70
7.22	$H'kk$ PMC (5) - Sistema Peruano . . . . .	70
7.23	$L'kk$ PMC (5) - Sistema Peruano . . . . .	70
7.24	Probabilidade - rede 14 Barras . . . . .	71
7.25	Probabilidade - rede 30 Barras . . . . .	71
7.26	Probabilidade - rede 57 Barras . . . . .	72
7.27	Probabilidade - rede 300 Barras . . . . .	72
7.28	Probabilidade - Sistema Peruano -460 barras . . . . .	72
7.29	Probabilidade - Sistema Brasileiro -1081 barras . . . . .	72

# Lista de Tabelas

4.1	Margem Mínima - fator de potência constante . . . . .	35
4.2	Margem Mínima - Diferentes valores de $\alpha_k$ e $\beta_k$ . . . . .	36
4.3	Margem Mínima – Limitando o tamanho de passo de incremento de carga $\Delta\lambda$ e mantendo $t$ constante . . . . .	37
5.1	Cálculo da margem mínima - $\alpha, \beta = \omega$ . . . . .	43
5.2	Cálculo da margem mínima - $[\alpha = \beta]$ Vetor unitário . . . . .	44
5.3	Cálculo da MET - $[\alpha = \beta]$ Vetor unitário, limitando $\lambda^*$ . . . . .	45
5.4	Obtenção da margem mínima METm- método B . . . . .	48
5.5	Valores da margem mínima METm e MET para fator de potência constante . . . . .	49
5.6	Comparação dos métodos para obter o PMC para uma rede de 2 barras . . . . .	49
5.7	Comparação entre métodos . . . . .	50
6.1	Barras críticas correspondentes à METm . . . . .	57
6.2	Resultados para situações de contingências usando o método da Seção 4.4 . . . . .	59
6.3	Resultados para situações de contingências usando o método da Seção 5.3 . . . . .	59
7.1	Cálculo da margem mínima - Usando sensibilidades . . . . .	65

# Capítulo 1

## Introdução

Os sistemas elétricos de potência são uma das criações mais complexas, robustas e indispensáveis feitas pelo homem na vida moderna. O homem moderno está habituado com o fornecimento contínuo de energia para suprir diversas necessidades. Entretanto, devido a sua complexidade, o contínuo aumento da população, da indústria, e, portanto, da demanda, tem levado estes sistemas a operarem próximos dos seus limites e por vezes, em situações de emergência que podem ameaçar o fornecimento contínuo de energia. Em casos mais severos, diferentes sistemas de potência têm experimentado blecautes nas últimas décadas e a frequência destes eventos tem aumentado notavelmente. O sistema interconectado Brasileiro está experimentando a ocorrência de blecautes, assim como na Europa, que são cada vez mais frequentes, acarretando grandes perdas econômicas para os países. Eles podem ser originados pela queda progressiva e descontrolada das tensões no sistema ou em uma grande parte do sistema, sendo que a queda progressiva das tensões pode ser ocasionada pela entrada/saída de diferentes elementos do sistema ou pelo contínuo aumento da carga sem o correspondente incremento da geração. Em alguns casos, a insuficiência de potência reativa para manter as tensões dentro dos respectivos limites tem contribuído para o colapso de tensão. Principalmente, ressalta-se os casos em que há incapacidade de transmitir essa potência reativa para os locais mais críticos em relação à perda de estabilidade. O blecaute pode ser total ou parcial devido ao desligamento em cascata de transformadores, geradores, linhas e à atuação das proteções.

Uma das tarefas dos engenheiros e pesquisadores em sistemas de potência é o estudo e desenvolvimento de ferramentas rápidas e de fácil implementação para manter o sistema operando em modo seguro e detectar situações de risco ou emergência, para tomar as melhores medidas de controle com o objetivo de evitar o colapso de tensão. Dentre estas ferramentas estão os métodos rápidos e eficientes para calcular os pontos de máximo carregamento, a distância desde o ponto de máximo carregamento até o ponto de operação atual da rede é conhecida como a margem de estabilidade de tensão. Este tipo de informação é indispensável no controle e monitoramento de sistemas de potência, visto que o sistema deve estar operando acima de um limiar predefinido. No caso do sistema Brasileiro, o ONS (Operador Nacional do Sistema Brasileiro) é o responsável pelo monitoramento e operação do sistema interligado nacional.

A margem mínima de estabilidade de tensão corresponde à pior direção de incremento de carga. Esta margem pode ocorrer depois de uma contingência severa (como a perda de um elemento importante), ou um aumento de carga severo. Esta margem pode ser menor que a margem para aumento de carga com fator de potência constante. Neste caso, o ponto de operação atual da rede está mais perto do ponto de colapso de tensão do ponto de vista das grandezas ativas (MW de carga), sendo uma área específica a que pode influir na perda de estabilidade.

É indispensável a identificação das áreas críticas que estão ameaçando o sistema para tomar as medidas de controle necessárias, tais como compensação reativa ou corte de carga. O método de análise modal pode ser uma ferramenta muito útil para fazer este tipo de estudos. Esta identificação das áreas críticas, por exemplo, no caso da pior direção de incremento de carga, pode ser usada para estudos de colapso de tensão, parcial ou localizado [1].

Este trabalho está dividido em oito capítulos que são brevemente descritos a seguir. No Capítulo 2 são apresentados conceitos gerais referentes aos tipos de estabilidades em sistemas de potência, estabilidade de tensão e técnicas de análise. Finalmente é apresentada a abordagem do problema no espaço de parâmetros de carga e seu equivalente em relação das curvas PV que são mais comumente usadas.

O Capítulo 3 apresenta um método para obter o ponto de máximo carregamento (PMC) da rede usando técnicas de otimização não-linear. Este PMC é calculado para uma direção de incremento de carga com fator de potência constante (as grandezas são incrementadas nas mesmas proporções) e é o valor normalmente avaliado na literatura [10, 11]. Os resultados do PMC para diferentes redes, obtidos para condições normais de operação, são apresentados neste mesmo capítulo.

O Capítulo 4 apresenta duas metodologias modificadas para calcular a margem mínima de estabilidade de tensão, baseadas em propostas já existentes na literatura [16, 17]. Segundo estas metodologias, para cada mudança de direção de incremento de carga é calculado o PMC com o método exposto no Capítulo 3, partindo do caso base em cada nova direção de incremento de carga. O problema pode ser abordado de duas maneiras: escolhendo uma direção de incremento de carga para fator de potência constante ou avaliando o autovetor esquerdo da matriz Jacobiana no caso base. Finalmente são apresentados os resultados mostrando que, com a segunda abordagem, na direção inicial do incremento de carga, o processo é mais eficiente.

O Capítulo 5 propõe duas novas metodologias para obter a margem mínima. Nestas metodologias não é necessário retornar para o ponto de operação inicial em cada mudança na direção do incremento de carga. Uma destas novas metodologias apresenta um bom desempenho, com redução significativa do número de iterações para obter a margem mínima.

O Capítulo 6 apresenta algumas pesquisas adicionais que foram desenvolvidas. Inicialmente, é mostrado um estudo geral para identificar as áreas críticas usando fatores de participação. São simuladas algumas contingências para avaliar os métodos apresentados anteriormente.

O Capítulo 7 apresenta estudos adicionais usando fatores de sensibilidade baseados na matriz Jacobiana. É apresentada uma nova proposta para calcular a margem mínima usando sensibilidades. São calculadas as áreas críticas do sistema usando sensibilidades em diferentes pontos de operação, e finalmente é feito um estudo da probabilidade de ocorrência do colapso de tensão nos diferentes pontos de operação calculados.

Por último, são apresentadas algumas conclusões e comentários referentes aos temas tratados. Adicionalmente, são mencionadas algumas sugestões para futuras pesquisas.

## Capítulo 2

# Estabilidade de sistemas elétricos de potência

Neste capítulo são apresentadas algumas generalidades dos sistemas elétricos de potência em relação aos tipos de estabilidade, aos tipos de estabilidade de tensão e à importância dos métodos de análise e de controle. Também são tratados alguns assuntos fundamentais para auxiliar o entendimento do problema da margem mínima de estabilidade de tensão.

A estabilidade de sistemas elétricos de potência é definida como a propriedade destes sistemas que permite que eles permaneçam em estado de operação de equilíbrio sob condições normais de operação e atinjam um estado de equilíbrio aceitável após a ocorrência de um distúrbio [1], [2]. Entende-se como distúrbio uma alteração no sistema, tal como uma mudança em um ou mais elementos do sistema e variações da carga, entre outros.

A ocorrência de instabilidade de sistemas elétricos de potência tem sido reconhecida como um grande problema para a segurança na operação dos sistemas elétricos de potência [1,2]. Muitos dos maiores blecautes causados por instabilidade de sistemas de potência têm mostrado a importância dos estudos de estabilidade. Devido ao contínuo crescimento dos sistemas de potência, o uso de novas tecnologias e de controles, e à operação do sistema sobre condições muito carregadas, diferentes formas de instabilidade têm surgido. Por exemplo, instabilidade de tensão, instabilidade de frequência e instabilidade transitória em redes com grande intercâmbio de potência são assuntos de grande interesse na atualidade. Um sistema de potência é um sistema altamente não-linear e que opera em um ambiente cujas características se alteram constantemente, como, por exemplo, mudanças na carga, saída de geradores e outros parâmetros de operação que mudam continuamente. Assim, na presença de um distúrbio, a estabilidade do sistema depende das condições iniciais de operação e da natureza desse distúrbio.

Os sistemas de potência estão sujeitos a um elevado número de distúrbios, de pequeno e grande impacto (estabilidade de tensão de pequenas e grandes perturbações, respectivamente). Na presença de pequenas perturbações, tais como pequenas variações de carga, o sistema deve ser capaz de se ajustar às novas condições e operar de forma satisfatória. No caso de grandes perturbações, como um curto-circuito ou a perda de um gerador, podem ocorrer mudanças estruturais devido à isolação dos elementos que falharam. O ponto de equilíbrio de um sistema de potência pode ser estável ou instável após um determinado distúrbio. Atualmente, não se considera economicamente viável projetar um sistema de potência que seja estável para qualquer distúrbio e portanto, uma classificação das contingências é feita segundo a probabilidade de ocorrência das mesmas [1].

A resposta de um sistema de potência a um distúrbio é consequência dos equipamentos que ele contém. Por exemplo, um curto-circuito em um elemento crítico, seguido pelo isolamento do mesmo, produzirá variações nos fluxos de potência, nas tensões das barras, e nas velocidades dos rotores dos geradores. As variações de tensão influem na ação dos reguladores de tensão, tanto nos geradores quanto na rede de transmissão. As variações na velocidade dos rotores têm importância nos controladores dos geradores, e as variações na tensão e na frequência afetam a carga. Outros dispositivos usados na proteção de equipamentos podem responder às variações do sistema ocasionando a saída do equipamento. Desse modo, o sistema se torna fraco e possivelmente comece a operar de forma instável. Alguns geradores e algumas cargas poderiam ser desligados para isolar um curto-circuito ou para preservar a operação contínua de um sistema de potência de grande porte. Na presença de contingências um sistema de potência interconectado poderia ser dividido em duas ou mais ilhas para preservar ao máximo a geração e a carga. Mediante a ação de controles automáticos ou dos operadores, o sistema pode restabelecer as condições normais de operação.

Alguns fatos importantes têm marcado o planejamento e a operação de sistemas elétricos de potência nas últimas décadas. O número de conexões entre empresas aumentou muito. Por exemplo, países como o Brasil e os Estados Unidos, entre outros, possuem praticamente um único sistema de potência, composto por um grande número de companhias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Por um lado, isto aumenta a confiabilidade no atendimento da demanda, já que a energia pode ser exportada pelas companhias que a tem em excesso para aquelas que apresentam déficit. Porém, os efeitos de perturbações na área de uma companhia podem se propagar e seus efeitos serem notados em todo o sistema. Logo, do ponto de vista de segurança da operação, o sistema pode ficar mais vulnerável. Os novos investimentos na expansão do sistema e instalação de novos equipamentos têm sido em sua maioria adiados e as causas são várias, incluindo desde as econômicas até as ambientais. Como a demanda tem aumentado consistentemente ao longo dos anos, os equipamentos já existentes passaram a operar cada vez mais próximos de seus limites e em consequência, a habilidade do sistema de manter condições aceitáveis de operação após perturbações tem diminuído bastante [2].

A estabilidade dos sistemas de potência pode ser classificada segundo :

- os equipamentos, os processos e o tempo de análise envolvido para determinar as condições de estabilidade a curto, médio e longo prazo.
- a natureza física que conduz o sistema ao modo instável, como no caso de estabilidade de ângulo do rotor e estabilidade de tensão.
- o grau de severidade do distúrbio (estabilidade de tensão de pequenas e grandes perturbações, estabilidade de ângulo do rotor de pequenos sinais, estabilidade transitória de ângulo).
- os métodos de análise mais apropriados para o cálculo e determinação das condições de estabilidade.

## 2.1 Estabilidade de curto, médio e longo prazos

As estabilidades de médio e longo prazos derivam da necessidade de analisar problemas associados com a resposta dinâmica de sistemas a distúrbios severos, que resultam em grandes variações de tensão, frequência e fluxos de potência e, portanto, requerem a atuação de dispositivos de atuação lenta, que não são modelados em estudos de estabilidade transitória. Alguns dos exemplos dos equipamentos que devem ser modelados nestes casos são as caldeiras de usinas térmicas, condutos



de unidades hidrelétricas, controle automático da geração, controle e proteção de usinas e sistemas de transmissão, saturação de transformadores, e efeitos de variações da frequência sobre as cargas da rede. A seguir são apresentados alguns tempos típicos de análise:

- Curto prazo ou transitório: 0 a 10 segundos.
- Médio prazo: 10 segundos a alguns minutos.
- Longo prazo: alguns minutos a dezenas de minutos.

## 2.2 Estabilidade de ângulo do rotor

A estabilidade de ângulo do rotor corresponde à habilidade das máquinas síncronas de um sistema interconectado de manter o sincronismo na presença de distúrbios. Este problema de estabilidade envolve o estudo de oscilações eletromecânicas inerentes aos sistemas de potência. Um fator importante neste problema é a maneira pela qual a potência na saída dos geradores varia enquanto os ângulos dos rotores oscilam. Para condições de estado estável existe um equilíbrio entre o torque mecânico na entrada e o torque eletromagnético na saída do gerador mantendo-se a velocidade constante. Na presença de um distúrbio, os rotores das máquinas experimentarão aceleração ou desaceleração. Se um gerador temporariamente acelera em relação aos outros, sua posição angular será adiantada com respeito aos geradores mais lentos e esta diferença angular resultará em uma transferência de parte da carga dos geradores mais lentos para os mais rápidos. Isto tende a reduzir a diferença de velocidade e, portanto, a diferença angular. Porém, a relação potência/ângulo nos geradores é altamente não-linear. Além de determinado limite, alguns distúrbios podem levar a situações em que o aumento da diferença angular é acompanhado por uma diminuição na transferência de carga entre os geradores, levando à instabilidade [1].

A estabilidade de ângulo de pequenos sinais corresponde à habilidade do sistema de potência de manter o sincronismo dos geradores após pequenos distúrbios. Dentre tais distúrbios pode-se citar variações de carga que sejam consideradas pequenas o suficiente para que as equações do modelo da rede possam ser linearizadas para fim de análise.

A estabilidade transitória de ângulo corresponde à habilidade do sistema de manter o sincronismo após a ocorrência de um distúrbio transitório severo, tal como um curto-circuito em uma linha de transmissão.

## 2.3 Estabilidade de tensão

A estabilidade de tensão refere-se à habilidade do sistema de potência em manter as tensões estáveis em todas as barras do sistema após ter sido submetido a um distúrbio a partir de um ponto de operação inicial conhecido como caso base. Essencialmente, depende da habilidade de manter ou restabelecer um equilíbrio entre a demanda e a geração no sistema de potência. A instabilidade de tensão pode ocorrer na forma de uma queda ou aumento progressivo das tensões de algumas barras, sendo que uma possível consequência da instabilidade de tensão é a perda de carga em uma determinada região ou área, assim como a saída de linhas de transmissão e outros equipamentos devido à atuação do sistema de proteção, levando ao colapso de tensão. O termo colapso de tensão define o processo pelo qual uma sequência de eventos acompanhados por instabilidade de tensão

conduz o sistema ao blecaute ou produz tensões muito baixas em uma parte significativa do sistema de potência.

A estabilidade de tensão pode ser classificada segundo diferentes categorias.

A estabilidade de tensão de grandes perturbações corresponde à habilidade do sistema de manter o controle das tensões na presença de grandes perturbações tais como faltas, perda de unidades geradoras ou contingências de linhas importantes. Esta habilidade é determinada pelas características da carga e pelas interações entre os dispositivos de controle e proteção. A avaliação das condições de estabilidade de tensão, após uma grande perturbação, pode requerer que a rede seja vista como um sistema dinâmico não-linear e modelada através de um sistema de equações algébrico-diferenciais não-lineares. O comportamento da rede deve ser analisado por um período de tempo grande o suficiente para permitir a identificação das interações dos dispositivos de controle e proteção, tais como os transformadores com ajuste da posição do tap sob carga e os limitadores da corrente de campo dos geradores. O intervalo de tempo de análise pode ser de alguns segundos até dezenas de minutos. Um critério para determinar a estabilidade de tensão de grandes perturbações de um sistema pode ser baseado nos níveis de tensão atingidos após a ocorrência da perturbação e da atuação dos dispositivos de controle e proteção. Se tais níveis forem aceitáveis o sistema é considerado estável.

A estabilidade de tensão de pequenas perturbações corresponde à habilidade do sistema de manter o controle das tensões após a ocorrência de pequenas perturbações tais como pequenas variações de carga. Esta habilidade é determinada pelas características de carga e pelas interações entre os dispositivos de controle e proteção em um certo instante de tempo. Os fatores que contribuem para a instabilidade de tensão de pequenas perturbações são essencialmente do tipo de regime permanente. Assim, abordagens e modelos de regime permanente podem ser usados com sucesso para a determinação de margens de estabilidade, identificar fatores que influenciam a estabilidade, e examinar uma grande gama de condições de operação, incluindo cenários pós-contingência. Um possível critério para se avaliar a estabilidade de tensão de pequenas perturbações em um sistema pode ser baseado na sensibilidade entre a magnitude da tensão e a injeção de potência reativa nos seus barramentos. Um sistema é instável se, em pelo menos uma de suas barras, a magnitude de tensão diminui se a injeção de potência reativa aumenta.

Como já mencionado, a instabilidade de tensão é caracterizada por uma queda progressiva das tensões do sistema, ou seja, por um desequilíbrio no perfil das tensões do sistema. A falta de suporte local de potência reativa assim como uma grande quantidade de potência reativa fluindo pelas linhas são os principais responsáveis pela instabilidade de tensão. O colapso de tensão é geralmente associado com a insuficiência de fornecimento de potência reativa nas áreas fracas. O colapso de tensão pode ser local ou pode envolver o sistema completo se as medidas de controle necessárias não forem tomadas rapidamente. O colapso de tensão apresenta-se comumente em redes muito carregadas (carga pesada), na falta de produção ou transmissão de potência reativa. Mudanças no sistema, como distúrbios severos ou variações importantes nos grandes centros de carga, agravam o cenário de colapso de tensão. O colapso de tensão pode ocorrer em três escalas de tempo: transitória, médio prazo e longo prazo. Na escala transitória, com um tempo de duração de até uns poucos segundos, devido à presença de transitórios em elementos tais como máquinas de indução e dispositivos de eletrônica de potência. Na escala de tempo de médio prazo, envolvendo tempos de até dezenas de segundos, na presença de elementos tais como os limitadores da corrente de excitação. Na escala de tempo de longo prazo o tempo envolvido é de até minutos e ocorre nos casos de restabelecimento de carga.

## 2.4 Técnicas de análise de estabilidade de tensão

As técnicas de análise de segurança de estabilidade de tensão devem ser empregadas no planejamento e na operação em tempo real dos sistemas de potência para usar a melhor combinação de componentes disponíveis com o objetivo de manter o sistema operando em modo seguro [4].

A estabilidade de tensão pode ser analisada via métodos dinâmicos e estáticos. Os métodos dinâmicos permitem analisar as características não-lineares em função do tempo, mas requerem um grande esforço computacional tornando problemáticas as aplicações em tempo real. Os métodos estáticos consideram nulas as derivadas das variáveis de estado em relação ao tempo, reduzindo a representação do sistema a variáveis algébricas, o que requer menor esforço computacional, viabilizando aplicações em tempo real. Com a abordagem estática é possível fazer estudos de estabilidade de tensão na presença de distúrbios e também é possível estimar pontos de bifurcação tipo sela-nó com a análise estática. Em [3] foram obtidos resultados semelhantes nas duas abordagens, tanto estática quanto dinâmica.

Na literatura têm sido desenvolvidos vários métodos para encontrar índices de estabilidade de tensão de maneira eficiente, sendo esta uma tarefa essencial nos estudos de estabilidade de tensão. Alguns trabalhos propõem índices baseados na informação sobre a proximidade ao ponto de colapso de tensão, analisando o mínimo valor singular da matriz Jacobiana [5,6]. O método da continuação é amplamente conhecido e pode ser usado para obter pontos de máximo carregamento, porém é lento, muito conservador e em alguns casos requer um elevado número de iterações para obter um valor de máximo carregamento apropriado [7].

Outros trabalhos para obter margens de estabilidade usando fatores de sensibilidade foram propostos [8]. Um método rápido para avaliar margens de segurança de estabilidade de tensão é apresentado em [9]. Também é possível monitorar o determinante da matriz Jacobiana, o qual, conforme o sistema aproxima-se do ponto de colapso, torna-se próximo de zero. A técnica dos autovalores pode ser utilizada para encontrar o ponto de colapso de tensão, pois no ponto de máximo carregamento um autovalor é igual a zero, mas em determinadas redes o autovalor pode variar drasticamente devido às não linearidades do sistema e indicar o modo crítico errado.

Alguns métodos estáticos para análise de estabilidade de tensão são:

- **Análise de sensibilidade:** os elementos da matriz Jacobiana fornecem a sensibilidade das barras em relação à perda de estabilidade de tensão. O sistema é estável se a sensibilidade é positiva para todas as barras. Isto quer dizer que, quando a injeção da potência reativa é aumentada, a magnitude da tensão aumenta de igual maneira. Se pelo menos uma barra apresenta sensibilidade negativa o sistema é considerado instável.
- **Fluxo de Carga da continuação:** o cálculo de fluxo de carga convencional apresenta problemas de convergência conforme o sistema aproxima-se ao ponto de colapso de tensão. O fluxo de carga da continuação corresponde a uma reformulação das equações de fluxo de carga modificando assim a matriz Jacobiana. Esta abordagem evita que a matriz seja singular no ponto de colapso de tensão ou na sua vizinhança. Esta metodologia permite traçar a curva PV tanto para pontos de operação estáveis como instáveis. Consiste em um método iterativo baseado em um esquema preditor a partir da solução inicial (por exemplo, baseado no vetor tangente) e um passo corretor, para obter o ponto de operação sobre a curva PV.
- **Análise de curvas PV, QV e SV:** a análise estática de estabilidade de tensão pode ser realizada através da obtenção do perfil das barras em função do seu carregamento (curvas PV,

QV ou SV). Estas curvas ajudam na identificação do estado do sistema para determinado carregamento e são usadas por diferentes empresas do setor elétrico para a avaliação da margem de estabilidade de tensão.

- **Análise modal:** a análise modal é útil na identificação das áreas ou barras críticas que contribuem para a perda de estabilidade ou o colapso de tensão. Com esta abordagem é possível obter os fatores de participação (FP) do sistema. Os FP indicam as medidas de controle mais eficientes para aliviar os problemas de estabilidade de tensão em determinado modo. Assim, podem ser identificados os melhores locais para a tomada de medidas de controle tais como corte de carga, compensação de reativos ou redespacho dos geradores.

Uma vantagem da análise modal em relação às curvas QV é o elevado número de curvas que devem ser analisadas para encontrar a área crítica. O método de análise modal consegue esta identificação de maneira mais simples e rápida [1].

## 2.5 Margem de estabilidade de tensão e margem mínima de estabilidade de tensão

A margem de estabilidade de tensão (MET) deve ser monitorada continuamente segundo os requerimentos das agências tais como a WECC (Western Electricity Coordinating Council) no caso da América do Norte ou o ONS (Operador Nacional do Sistema Brasileiro) no caso do Brasil. No caso em que o sistema esteja operando em estado de emergência, devem ser implementadas ações de controle tais como redespacho da geração, compensação de reativos ou corte de carga entre outros, com o objetivo de manter o valor da MET dentro dos níveis exigidos pelas agências mencionadas anteriormente. As empresas têm a necessidade de estabelecer procedimentos com o objetivo de manter o sistema operando no estado seguro com relação à estabilidade de tensão. Dentre estes procedimentos está o estabelecido pelo ONS para o sistema interconectado Brasileiro. Este procedimento determina uma MET de 6% para o cenário (n - 1). Sendo que (n - 0) corresponde ao estado de operação normal do sistema e (n - 1) ao estado de operação na presença de uma contingência simples. Para o estado de operação normal do sistema a margem deve ser um pouco maior de 6% enquanto o WECC estabelece uma margem de 5% para condições de operação (n - 1) [10, 11].

A distância desde o ponto de operação corrente até o ponto de instabilidade de tensão é normalmente determinada incrementando a carga do sistema em uma direção predefinida, representando o mais provável cenário de incremento de carga baseado em dados históricos ou em dados previstos [1].

Usualmente a MET é calculada para uma direção de incremento de carga que corresponde a aumentar todas as cargas com fator de potência constante, acompanhado do aumento dos MW da geração até que os limites sejam atingidos. Este incremento de carga é feito usando um fator de carregamento global  $\lambda$  que multiplica os valores do caso base (ponto de operação atual da rede). Porém, é provável que apareçam imprevistos ou inesperados incrementos de carga em uma barra ou área resultando em uma menor MET. Menores MET podem conduzir o sistema ao estado de emergência e conseqüentemente à fronteira de factibilidade onde ocorre o colapso de tensão.

A margem mínima de segurança de estabilidade de tensão (METm) corresponde à medição em porcentagem, p.u, MW, MVar ou MVA desde o ponto de operação atual do sistema até um ponto crítico onde o sistema perde estabilidade na pior direção de incremento de carga. Este ponto crítico sob determinadas condições corresponde ao ponto de máximo carregamento da rede (PMC),

localizado sobre a fronteira de factibilidade, e é também conhecido como ponto de bifurcação, onde apresenta-se o colapso de tensão.

## 2.6 Abordagem estática do fluxo de carga

O programa de fluxo de carga é uma ferramenta básica usada no planejamento e na operação de sistemas de potência. O objetivo de um programa de fluxo de carga é determinar o estado de operação de uma rede (tensões) e fluxos pela rede, etc, correspondente a determinado ponto de operação. Dentre os métodos de fluxo de carga, o método de Newton tem demonstrado ser um método eficiente e robusto. Porém, possui algumas dificuldades para resolver alguns problemas de fluxo de carga, pois para estes, o processo pode não atingir convergência, embora o sistema esteja na região factível como no caso de um sistema mal-condicionado. O fluxo de carga convencional não fornece uma solução para condições de operação na região infactível. Esta situação pode ocorrer na presença de contingências severas ou incrementos de carga imprevistos sem o correspondente incremento no fornecimento de reativos ou da capacidade das redes de transmissão, conduzindo à perda de estabilidade e conseqüentemente ao colapso de tensão. Nesta situação, o fluxo de carga não converge ou atinge o limite de iterações e os resultados não têm significado [8,14].

As equações linearizadas de fluxo de carga podem ser escritas da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

em que  $(\Delta P, \Delta Q)$  são os “mismatches” de potência, dados pela diferença entre os valores especificados e os valores calculados em cada iteração;  $(\Delta \theta, \Delta V)$  são as correções no estado da rede (respectivamente os ângulos de fase e as magnitudes de tensão); e  $J$  é a matriz Jacobiana, que fornece informações sobre as sensibilidades entre potências e tensões.  $J$  pode ser decomposta em quatro submatrizes, como mostrado em (2.1).

O método de fluxo de carga consiste em encontrar o ponto de operação do sistema, ou seja, o estado das variáveis  $(V, \theta)$ . Nos estudos de estabilidade de tensão, monitorar a matriz Jacobiana resulta em uma técnica útil, pois, à medida que o sistema aproxima-se ao ponto de colapso de tensão, a matriz Jacobiana aproxima-se da singularidade.

A Figura 2.1 mostra o espaço em parâmetros de carga para um sistema de potência qualquer. O espaço está dividido em duas regiões, a região factível e a região infactível, que são separadas pela fronteira de factibilidade. Na fronteira de factibilidade é encontrado o ponto de máximo carregamento (PMC) da rede, onde ocorre o colapso de tensão. Os pontos de operação **I**, **II** e **III** estão na região factível, enquanto o ponto de operação **IV** está na região infactível. O ponto de operação **I** corresponde a um estado seguro, onde a demanda é suprida e não há violações dos limites, tanto para operação em condições normais, quanto para a operação na presença de contingências. O ponto de operação **II** corresponde ao estado de alerta, em que a demanda é suprida e não há violações dos limites para condições normais de operação, entretanto, podem ocorrer violações para condições de operação na presença de contingências. O ponto de operação **III** corresponde ao estado de emergência, em que a carga é suprida, porém, aparecem algumas violações dos limites. A operação no estado de emergência é possível por um tempo determinado, entretanto, devem ser executadas ações corretivas para garantir a volta à operação no estado estável. O ponto de operação **IV**, corresponde a uma situação infactível, pois a carga não pode ser suprida e a operação não é possível.

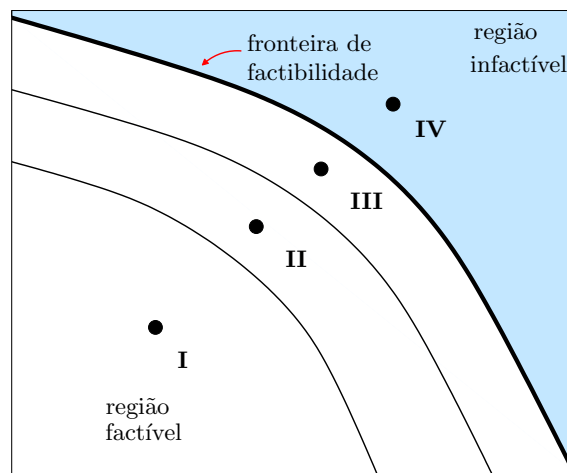


Figura 2.1: Espaço em parâmetros de carga

A matriz Jacobiana pode ser reescrita em função de seus autovalores e autovetores

$$J = \boldsymbol{\nu} \cdot \Lambda \cdot \boldsymbol{\omega}^T, \quad (2.2)$$

onde  $\boldsymbol{\nu}$  corresponde aos autovetores direitos de  $J$ ,  $\Lambda$  corresponde ao conjunto de autovalores de  $J$  e  $\boldsymbol{\omega}$  corresponde aos autovetores esquerdos de  $J$ .

O autovetores direitos ( $\boldsymbol{\nu}$ ) indicam as alterações nas variáveis estáticas (magnitude e ângulo da tensão) na direção do colapso de tensão. Portanto,  $\boldsymbol{\nu}$  revela quais variáveis são as responsáveis por conduzir o sistema ao colapso de tensão. Sendo que as maiores componentes de  $\boldsymbol{\nu}$  indicam as barras onde as magnitudes das tensões diminuirão mais rapidamente [1], [16], [17]. Por outro lado, o autovetor esquerdo ( $\boldsymbol{\omega}$ ) mostra quais variáveis estáticas tem maior efeito no colapso de tensão e também indica a direção mais crítica de incremento de carga que causa a bifurcação. Na prática este autovetor provê os incrementos de carga, tanto ativa (MW) quanto reativa (MVar) para cada barra. Por conseguinte, o autovetor esquerdo indica quais medidas de controle são mais eficientes com o objetivo de controlar a perda de estabilidade.

Deste modo, neste trabalho aproveita-se o autovetor esquerdo, como é mostrado na Figura 2.2. O autovetor esquerdo correspondente ao autovalor nulo da matriz Jacobiana pode ser interpretado como um vetor normal à superfície ou ao conjunto de hiperplanos que conformam a fronteira de factibilidade.  $\boldsymbol{\omega}_1$ ,  $\boldsymbol{\omega}_2$ ,  $\boldsymbol{\omega}_3$  e  $\boldsymbol{\omega}_4$  são autovetores esquerdos e eles são normais à fronteira de factibilidade. Como será mostrado no Capítulo 4, pelo fato de o autovetor esquerdo ser um vetor normal à dita superfície, ele é usado para calcular o pior cenário de incremento de carga mediante um algoritmo iterativo até que os dois últimos autovetores sejam paralelos, isto é, quando a diferença entre  $\boldsymbol{\omega}_3$  e  $\boldsymbol{\omega}_4$  for nula ou muito pequena (menor que determinada tolerância). No caso da Figura 2.2 o caso base corresponde ao ponto de operação atual da rede, a direção inicial corresponde a uma direção inicial de incremento de carga que será definida no Capítulo 4 e a direção final corresponde ao pior cenário de incremento de carga [1, 12, 13].

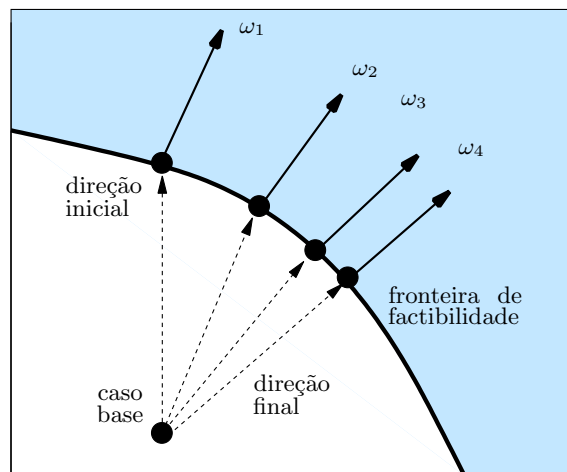


Figura 2.2: Aproveitamento do autovetor esquerdo

## 2.7 Comparação entre o espaço em parâmetros de carga e a curva PV

As Figuras 2.3 e 2.4 mostram uma comparação entre o espaço de parâmetros de carga e a curva PV. As curvas PV são amplamente conhecidas pelos engenheiros de sistemas de potência, pois é muito usada na análise de estabilidade para estudos acadêmicos e práticos. Neste trabalho utiliza-se também o espaço de parâmetros de carga dado em  $(P, Q)$  pois neste espaço pode ser definida a margem de estabilidade de tensão em função das injeções de potências. Segundo a Figura 2.3 o caso base indica o ponto de operação atual da rede. Seguindo uma direção de incremento de carga, que pode ser preestabelecida segundo dados históricos ou mediante previsão de carga, o sistema é carregado até encontrar o PMC. A distância desde o caso base até o PMC é conhecida como margem de estabilidade de tensão (MET). A situação equivalente na curva PV é mostrada na Figura 2.4, onde, desde o caso base, a carga é incrementada até encontrar o PMC no extremo da curva PV. A necessidade de usar o espaço de parâmetros de carga será mostrado nos Capítulos 4 e 5, onde a MET é obtida para diferentes direções de incremento de carga até encontrar a pior direção de incremento de carga, que corresponde à margem mínima. A margem neste espaço de parâmetros de carga pode ser calculada em MVA, MW, MVar, porcentagem ou p.u.

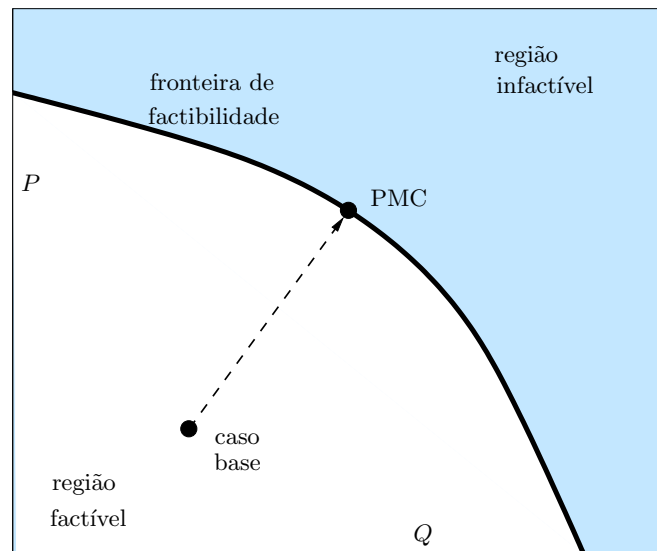


Figura 2.3: Espaço de parâmetros de carga

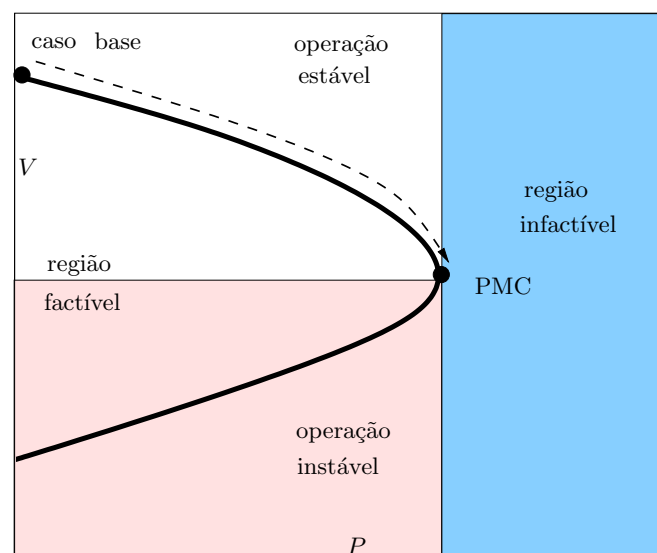


Figura 2.4: Curva PV



## Capítulo 3

# Cálculo do ponto de máximo carregamento de sistemas elétricos de potência

Neste capítulo, apresenta-se uma metodologia para calcular o ponto de máximo carregamento (PMC) de um sistema de potência usando técnicas de programação não-linear para determinada direção de incremento de carga [9]. A idéia é implementar uma rotina eficiente do ponto de vista computacional e que permita calcular o PMC de uma maneira precisa.

O PMC, calculado nesta parte do trabalho, é avaliado para fator de potência constante, sendo que esta é a direção de incremento de carga que normalmente é avaliada nos programas computacionais, na literatura e pelas agências encarregadas do monitoramento e operação do sistema. É implementado o fluxo de carga com otimização de passo, que trata apropriadamente problemas de convergência e permite obter informações relevantes para pontos de operação na região infactível. Finalmente, são mostrados os resultados de simulações para diferentes redes.

### 3.1 Modelo de fluxo de carga modificado

O ponto de operação do sistema é obtido a partir da seguinte equação algébrica não-linear:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \lambda) = 0, \quad (3.1)$$

em que  $\mathbf{g}$  corresponde ao vetor dos “mismatches” das potências ativa e reativa,  $\mathbf{x}$  corresponde às variáveis de estado do sistema (magnitudes e ângulos das tensões) e  $\lambda$  corresponde ao fator de carregamento, relacionado com a geração e carga que pode ser incrementada desde o ponto de operação inicial (caso base), até o ponto de máximo carregamento (PMC). A equação (3.1) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{cases} (1 + \alpha_k \lambda) P_k^{sch} - P_k^c = 0 \\ (1 + \beta_k \lambda) Q_k^{sch} - Q_k^c = 0, \end{cases} \quad (3.2)$$

onde  $(P_k^{sch}, Q_k^{sch})$  correspondem às potências ativa e reativa especificadas e  $(P_k^c, Q_k^c)$  correspondem

às potências calculadas, sendo que as potências especificadas são dadas pela diferença entre as potências geradas e consumidas em cada barra. O fator de carregamento varia entre 0 ( $\lambda = 0$ , para o caso base) e um valor crítico correspondente ao ponto de máximo carregamento ( $\lambda^{cr}$ ).  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  são escalares que podem ser ajustados para definir uma direção de incremento de carga. Por exemplo, no caso de  $\alpha_k = \beta_k = 1$ , a carga será incrementada com fator de potência constante, enquanto que para  $\alpha_k = 1$  e  $\beta_k = 0$ , só será incrementada a componente da carga correspondente à potência ativa, com a reativa mantida constante, igual ao caso base. Os limites de geração de potência reativa dos geradores são levados em consideração e havendo violações de reativos nas barras PV, elas são convertidas para barras PQ. Se alguma barra não apresenta mais violações nos limites de reativos, esta pode ser transformada em barra PV novamente [9]. O conjunto de equações de fluxo de carga (3.1) pode ser resolvido pelo método de Newton.

### 3.2 Fluxo de carga com otimização de passo

O fluxo de carga com otimização de passo (FCOP) foi inicialmente desenvolvido para resolver problemas de fluxo de carga para sistemas mal condicionados, para os quais embora o sistema esteja operando na região estável, o fluxo de carga convencional exibe um pobre desempenho ou simplesmente diverge [21]. O FCOP consiste na atualização do vetor de estado  $\mathbf{x}$  em uma iteração  $\eta$  dada por:

$$\mathbf{x}^{\eta+1} = \mathbf{x}^{\eta} + \mu [\mathbf{J}(\mathbf{x}^{\eta})]^{-1} \Delta \mathbf{S}^{\eta}, \quad (3.3)$$

em que  $\Delta \mathbf{S}^{\eta}$  é o vetor de “mismatches” de potência ativa e reativa,  $\mathbf{J}(\mathbf{x}^{\eta})$  é a matriz Jacobiana e  $\mu$  é o multiplicador ótimo, calculado de forma a minimizar uma equação quadrática baseada nos “mismatches” de potência. Para sistemas bem-condicionados,  $\mu$  assume valores próximos de 1, seguindo o comportamento do fluxo de carga convencional. Para sistemas mal-condicionados,  $\mu$  assume valores com o objetivo de minimizar a função quadrática baseada nos erros das potências (*mismatches*). Nos casos de pontos de operação infactíveis, o multiplicador ótimo tende a zero levando-o a um ponto de operação na fronteira de factibilidade [8, 9, 14]. Desta maneira, o FCOP fornece informação importante nos estudos de estabilidade e colapso de tensão. No caso de um incremento de carga súbito ou uma contingência, o sistema poderia tender a operar na região infactível, o que na prática é impossível. O FCOP identifica esta situação e fornece uma informação baseada nos erros das potências. Esta informação é muito útil para levar o sistema da região infactível para a fronteira de factibilidade. Neste trabalho, o método de FCOP utilizado corresponde ao proposto em [14], cuja precisão e robustez são também demonstradas em [22].

### 3.3 Cálculo do PMC usando técnicas de otimização

#### 3.3.1 Introdução

Alguns elementos da matriz Jacobiana apresentam um comportamento suave frente a variações da demanda. Por exemplo, a variação de potência ativa de determinada barra ( $P_k$ ) em relação à tensão da mesma barra ( $V_k$ ) apresenta um comportamento crescente quando  $k$  é a barra *slack*, e decrescente, quando  $k$  é uma barra de carga (PQ). Assim, este tipo de informação é relevante para formular um problema de otimização. Depois de definir a função a minimizar do problema de otimização, resta definir as restrições de operação, que no caso podem ser dadas pelas equações

de fluxo de carga. Com os parâmetros anteriores, tem-se um processo em que, a partir do ponto de operação inicial (caso base), são definidos sucessivos acréscimos de carga que levam o sistema em direção ao ponto de máximo carregamento. A introdução de um controle do tamanho de passo pode resultar em uma vantagem do processo, fazendo com que o passo seja relativamente grande no começo, e cada vez menor conforme este se aproxima da fronteira de factibilidade. O método consiste de duas etapas, ambas baseadas em problemas de programação não-linear. A primeira etapa corresponde à determinação de incrementos de carga para encontrar o PMC. A segunda etapa corresponde à implementação de corte de carga caso um incremento de carga excessivo conduza o sistema a operar na região infactível, devido à ultrapassagem do limite de carregamento [9, 23].

### 3.3.2 Determinação de incrementos de carga

A Figura 3.1 mostra a idéia geral da primeira etapa para calcular o PMC. O fator  $\lambda$  é aumentado desde o caso base  $\lambda_0$ , com o objetivo de encontrar o PMC. O tamanho do passo diminui conforme  $\lambda$  aproxima-se do PMC ( $\lambda_4$ ).

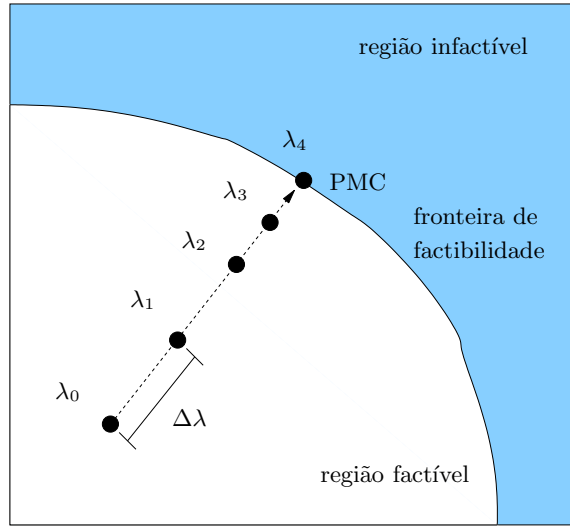


Figura 3.1: Incremento do fator de carga  $\lambda$  para encontrar o PMC

Os incrementos de carga  $\Delta\lambda$  em direção ao PMC podem ser obtidos através da minimização de uma função objetivo. Devido à característica ordenada (variação favorável) em função das variações de carga, é definido, como função objetivo, o elemento  $N_{kk}$  ( $\partial P_k / \partial V_k$ ) da matriz Jacobiana.

Matematicamente, o problema de incremento de carga pode ser definido como:

$$\begin{cases} \min & f(\mathbf{x}, \lambda) \\ \text{s.a.} & \mathbf{g}(\mathbf{x}, \lambda) = 0. \end{cases} \quad (3.4)$$

A função objetivo  $f$  pode ser escrita em termos das variáveis de estado do sistema  $\mathbf{x}$  como:

$$f(\mathbf{x}, \lambda) = -\partial P_k / \partial V_k = -2G_{kk}V_k - \sum_{j \in \Omega_k} V_j (G_{kj} \cos \theta_{kj} + B_{kj} \sin \theta_{kj}), \quad (3.5)$$

em que  $G$  e  $B$  são elementos da matriz de admitância nodal. Neste caso,  $k$  corresponde à barra

slack. A função Lagrangeana associada ao problema (3.4) pode ser expressa como:

$$\mathcal{L} = f(\mathbf{x}, \lambda) + v^T \mathbf{g}(\mathbf{x}, \lambda). \quad (3.6)$$

Utilizando as condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) tem-se:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_x &= \mathbf{f}_x + \mathbf{g}_x^T v = 0, \\ \mathcal{L}_v &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \lambda) = 0, \\ \mathcal{L}_\lambda &= f_\lambda + \mathbf{g}_\lambda^T v = 0. \end{aligned} \quad (3.7)$$

A partir do conjunto de equações dado por (3.7), a sensibilidade da função objetivo  $f$ , em função do fator de carregamento  $\lambda$  é dada por:

$$f_\lambda = \mathbf{g}_\lambda^T (\mathbf{g}_x^T)^{-1} \mathbf{f}_x. \quad (3.8)$$

De forma prática, uma relação para estimar um novo valor de  $\lambda$  pode ser escrita como:

$$f_\lambda \approx \frac{\Delta f}{\Delta \lambda}. \quad (3.9)$$

Os incrementos de carga para uma iteração  $\eta$ , de forma explícita e para um sistema de  $n$  barras, são dados por:

$$\Delta \lambda = \lambda^{\eta+1} - \lambda^\eta = -\sigma \cdot \frac{f(\mathbf{x}, \lambda)}{\mathbf{g}_\lambda^T (\mathbf{g}_x^T)^{-1} \mathbf{f}_x}, \quad (3.10)$$

onde  $\Delta \lambda$  corresponde ao incremento de carga,  $f(\mathbf{x}, \lambda)$  corresponde à função objetivo que é dada pela sensibilidade da potência ativa em relação à magnitude da tensão ( $\partial P_k / \partial V_k$ ),  $\mathbf{g}_x^T$  corresponde à transposta da matriz Jacobiana,  $\mathbf{f}_x$  corresponde à derivada da função objetivo em relação as variáveis estáticas ( $\mathbf{x} = V, \theta$ ) e  $\mathbf{g}_\lambda^T$  corresponde ao vetor tangente da matriz Jacobiana.  $\sigma$  representa um escalar positivo, comum em muitos problemas de otimização. Incluído para efetuar controle apropriado do tamanho do passo nos incrementos de carga. Conforme o sistema aproxima-se da fronteira de factibilidade, estes acréscimos de carga  $\Delta \lambda$  deverão resultar em valores menores. No limite da fronteira de factibilidade, para evitar ultrapassagem, esse valor deve tender a zero ( $\Delta \lambda \approx 0$ ). Dessa forma, uma expressão apropriada para o controle do tamanho de passo  $\sigma$  é definido por:

$$\sigma = \frac{t}{\|\mathbf{g}_\lambda\|_2}, \quad (3.11)$$

onde  $t$  é um escalar predefinido e ajustado heurísticamente e  $\|\mathbf{g}_\lambda\|_2$  é a norma do vetor tangente. Este último aumenta conforme o sistema aproxima-se do PMC, garantindo um passo ou incremento de carga cada vez menor [7], [15].

### 3.3.3 Corte de carga

O cálculo de um novo ponto de operação dado pela equação (3.10) pode conduzir o sistema a operar à região ineficiente. Deve-se implementar um corte de carga com o objetivo de levar o sistema

a operar de volta na região factível. A Figura 3.2 apresenta tal situação.  $\lambda_4$  é um ponto de operação infactível, enquanto que  $\lambda_5$  é o ponto que deveria ter sido calculado.

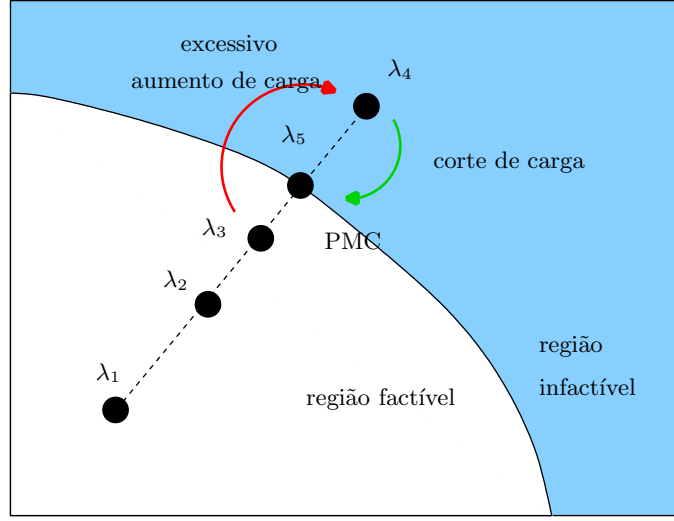


Figura 3.2: Corte de carga no caso de situações infactíveis

Para  $\lambda_4$  (região infactível) o método de fluxo de carga convencional não converge. No caso do fluxo de carga com otimização de passo (FCOP), o multiplicador ótimo tende a zero ( $\mu = 0$ ). O FCOP fornece informação da distância desde o ponto de operação infactível ( $\lambda_4$ ) até a fronteira de factibilidade ( $\lambda_5$ ) fundamentado nos “mismatches” de potência para o caso não convergido. Assim, a solução do problema é obtida analisando a informação contida nos “mismatches” de potência fornecidos pelo FCOP sobre a distância do ponto de operação factível até a fronteira de factibilidade. Isto conduz à formulação de um problema de otimização onde a idéia principal é implementar cortes de carga para minimizar os “mismatches” de potência obtidos pelo FCOP. O problema pode ser formulado como:

$$\begin{cases} \min & f(\mathbf{x}, \lambda) \\ \text{s.a.} & \mathbf{g}(\mathbf{x}, \lambda) = 0. \end{cases} \quad (3.12)$$

A função objetivo  $f$  pode ser definida em termos dos mismatches de potência ativa e reativa  $\mathbf{g}$  e é dada por:

$$f(\mathbf{x}, \lambda) = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{g}^T \mathbf{g} = \frac{1}{2} \cdot \|\mathbf{g}\|_2^2. \quad (3.13)$$

A função Lagrangeana é definida como:

$$\mathcal{L} = f(\mathbf{x}, \lambda) + v^T \mathbf{g}(\mathbf{x}, \lambda). \quad (3.14)$$

Aplicando as condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) tem-se:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_x &= \mathbf{f}_x + \mathbf{g}_x^T v = 0, \\ \mathcal{L}_v &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \lambda) = 0, \\ \mathcal{L}_\lambda &= f_\lambda + \mathbf{g}_\lambda^T v = 0. \end{aligned} \quad (3.15)$$

A sensibilidade da função objetivo em relação aos cortes de carga a partir do conjunto de equações dado por (3.15) é expressa por:

$$f_\lambda = \mathbf{g}_\lambda^T (\mathbf{g}_x^T)^{-1} \mathbf{f}_x. \quad (3.16)$$

O termo  $\mathbf{f}_x$  pode ser reescrito como:

$$\mathbf{f}_x = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left[ \frac{1}{2} \mathbf{g}^T \mathbf{g} \right] = \left( \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g} \right)^T \mathbf{g} = \mathbf{g}_x^T \mathbf{g}. \quad (3.17)$$

Substituindo (3.17) em (3.16) obtém-se:

$$f_\lambda = \mathbf{g}_\lambda^T \mathbf{g} \approx \frac{\Delta f}{\Delta \lambda}. \quad (3.18)$$

O ajuste de carga na iteração  $\eta$  é dado por:

$$\Delta \lambda = \lambda^{\eta+1} - \lambda^\eta = - \frac{f(\mathbf{x}, \lambda)}{f_\lambda} = - \frac{1}{2} \frac{\|\mathbf{g}\|_2^2}{\mathbf{g}_\lambda^T \mathbf{g}}. \quad (3.19)$$

De forma explícita para um sistema de  $n$  barras tem-se:

$$\Delta \lambda = \lambda^{\eta+1} - \lambda^\eta = - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\sum_{k=1}^n (\Delta P_k^2 + \Delta Q_k^2)}{\sum_{k=1}^n (P_k^{sch} \Delta P_k + Q_k^{sch} \Delta Q_k)} \right). \quad (3.20)$$

A expressão (3.20) pode ser facilmente calculada com os erros das potências ativa ( $\Delta P$ ) e reativa ( $\Delta Q$ ) e as potências ativa ( $P^{sch}$ ) e reativa ( $Q^{sch}$ ) programadas. É importante enfatizar que as quantidades ativas e reativas são calculadas no caso das barras PQ, enquanto para as barras PV apenas as quantidades ativas são calculadas.

### 3.3.4 Corte de carga simplificado

Em alguns casos é conveniente usar a seguinte equação modificada de corte de carga, com o objetivo de acelerar o processo de retorno para a fronteira de estabilidade:

$$\Delta \lambda = \lambda^{\eta+1} - \lambda^\eta = - \frac{1}{2} \frac{\|\mathbf{g}\|_2^2}{\mathbf{g}_\lambda^T \mathbf{g}} \cdot \beta, \quad (3.21)$$

onde  $\beta$  é um fator de aceleração que ajuda retornar o ponto de operação na fronteira de factibilidade com maior eficiência. Este é definido como:

$$\beta = 2 \frac{\mathbf{g}_\lambda^T \mathbf{g}}{\|\mathbf{g}\|_2}, \quad (3.22)$$

ou, de forma explícita:

$$\Delta\lambda = \lambda^{\eta+1} - \lambda^\eta = - \left[ \sum_{k=1}^n (\Delta P_k^2 + \Delta Q_k^2) \right]^{1/2}. \quad (3.23)$$

A expressão (3.23) é muito simples de calcular, usando apenas os erros das potências ativa ( $\Delta P$ ) e reativa ( $\Delta Q$ ). Como no caso da expressão (3.20), as quantidades ativas e reativas são calculadas no caso das barras PQ, enquanto no caso das barras PV apenas as quantidades ativas são calculadas.

O procedimento de corte de carga é executado até que a diferença entre dois carregamentos consecutivos seja menor que uma tolerância predefinida.

### 3.4 Resultados

O critério de parada do processo é baseado na comparação de dois cortes de carga consecutivos. Quando a diferença entre estes dois cortes de carga é menor que uma tolerância ( $tol < 0,005$ ) o processo é interrompido e o valor de  $\lambda$  corresponde ao PMC.

#### 3.4.1 Cálculo do PMC para $\alpha=\beta=1$

Os algoritmos propostos neste trabalho foram implementados em MatLab®. O método proposto neste capítulo foi avaliado através do cálculo do ponto de máximo carregamento (PMC) para diferentes sistemas de potência. Foram utilizados um sistema muito simples de 2 barras (barra slack alimentando uma barra de carga – no caso base com uma carga de 50 MW e 30 MVar – através de uma linha de transmissão sem perdas –  $x = 0,25$  pu) [16], os sistemas IEEE de 14, 30, 57 e 300 barras [20], e o sistema 1081 barras, 1654 ramos, rede real que corresponde a uma parte do sistema interconectado Brasileiro.

Para a rede de 2 barras, cujo resultado está representado na Figura 3.3, é utilizado um valor de 0,02 para o escalar  $t$  e são necessárias 7 iterações de incremento de carga e 2 iterações de corte de carga para calcular o PMC  $\lambda = 1,2753$ . O PMC está muito longe do caso base por que é uma rede que está originalmente pouco carregada.

Para as redes de 14, 30 e 57 barras – Figuras 3.4 a 3.6 – o valor de  $t$  é definido em 0,1 e o PMC é obtido de forma eficiente, usando poucas iterações no processo de incremento de carga e 2 iterações no processo de corte de carga.

Para as redes de 300 e 1081 barras – Figuras 3.7 e 3.8 – é utilizado um valor do escalar  $t$  de 0,4 e 0,05, respectivamente. Estas redes foram as redes mais carregadas dentre os sistemas testados, apresentando valores de carregamento de 5,89% e 0,47%, respectivamente. Na rede de 1081 barras é possível identificar as etapas do procedimento para obter o PMC separadamente, tanto de incremento de carga quanto de corte de carga, onde 3 iterações são necessárias para obter o PMC.

#### 3.4.2 Influência da direção de incremento de carga: fator de potência constante, vetor unitário

No caso anterior, foi apresentado o cálculo do PMC para diferentes redes incrementando a carga com fator de potência constante. Neste caso, é mantida a mesma idéia exceto que o vetor que

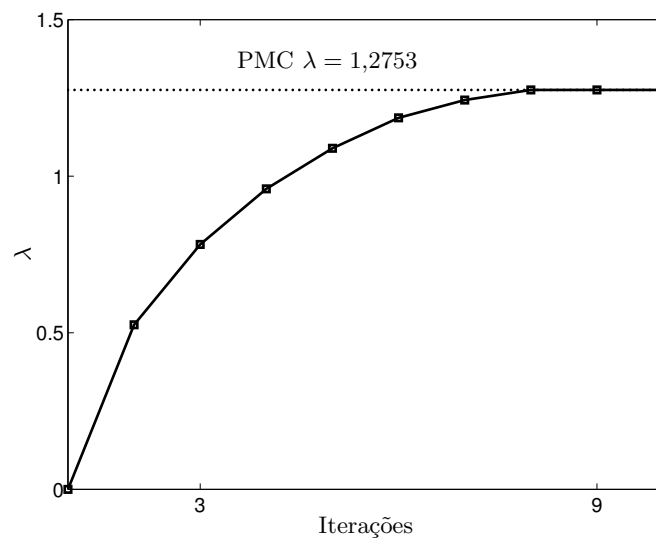


Figura 3.3: PMC - sistema de 2 barras

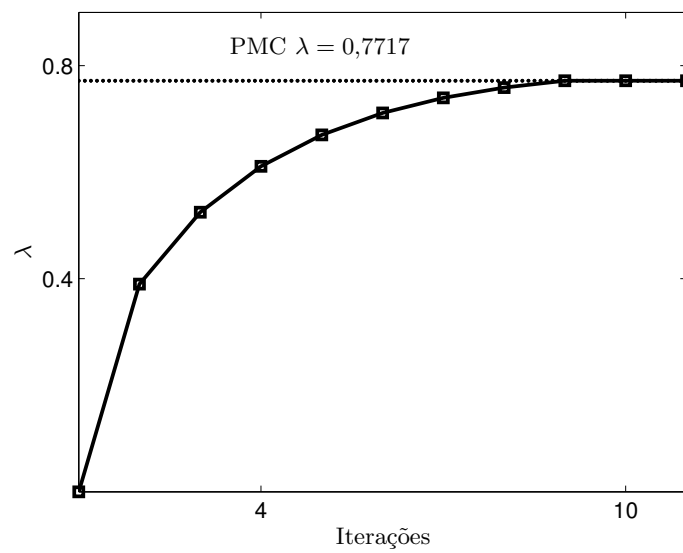


Figura 3.4: PMC - sistema de IEEE 14 barras



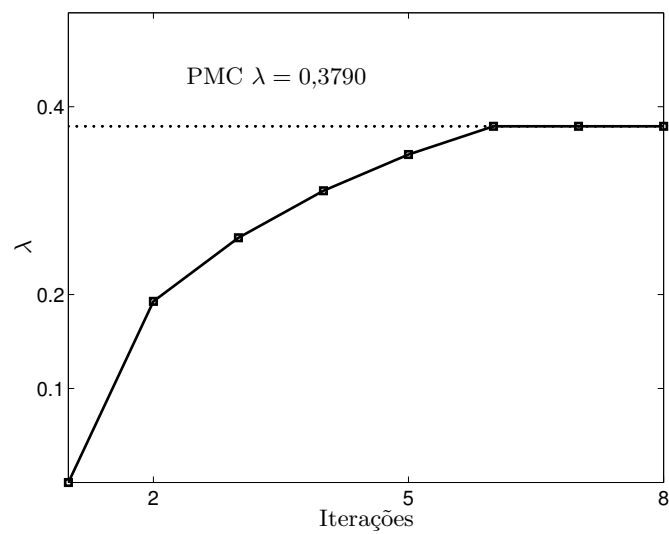


Figura 3.5: PMC - sistema IEEE 30 barras

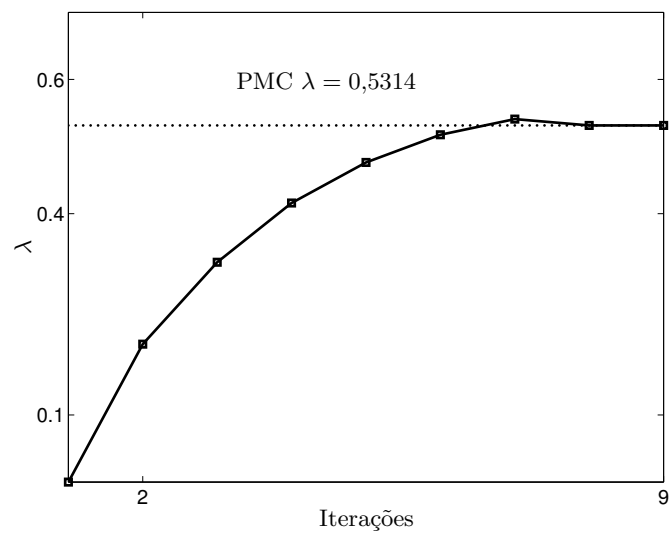


Figura 3.6: PMC - sistema IEEE 57 barras

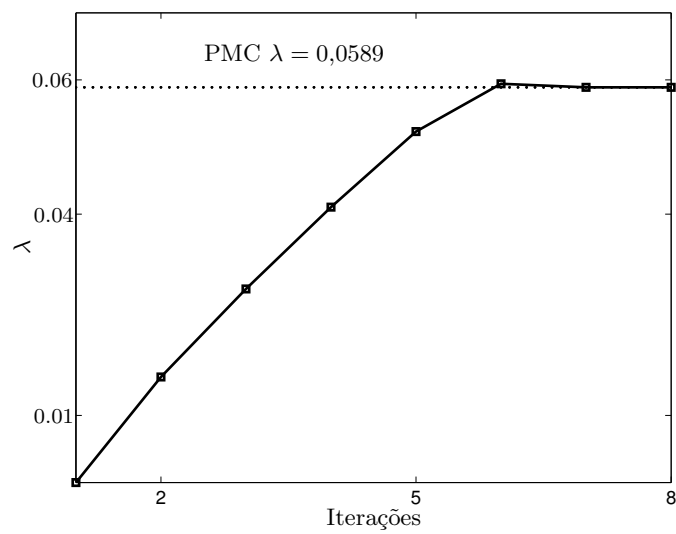


Figura 3.7: PMC - sistema IEEE 300 barras

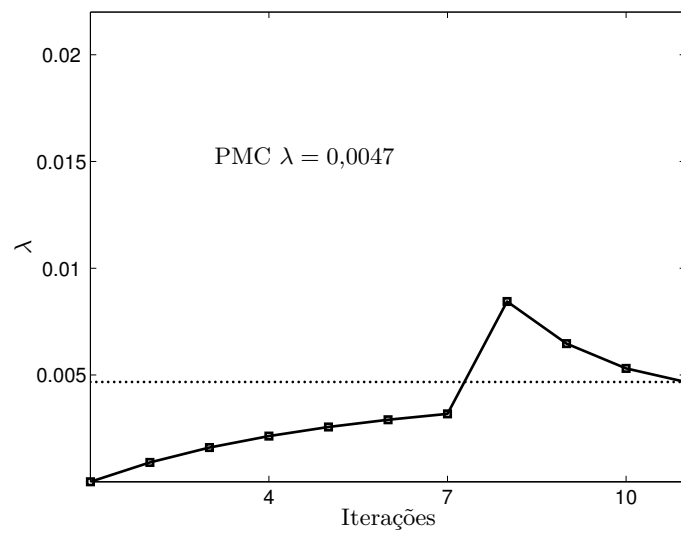


Figura 3.8: PMC - sistema 1081 barras

define a direção de incremento de carga ( $\alpha_k$  e  $\beta_k$ ) é unitário (norma Euclideana igual a um). As Figuras 3.9 a 3.14 mostram o cálculo do PMC. Embora o ponto de operação seja o mesmo, o valor do  $\lambda$  é diferente, como consequência de que os valores de  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  são diferentes.

Para o sistema de 2 barras é definido um valor de  $t$  de 0,05. Para a rede de 14 barras é definido um valor de  $t$  de 0,015; para as redes de 30, 57 e 300 é definido um valor de  $t$  de 0,01, 0,003 e 0,02. Por último para a rede de 1081 barras é definido um valor de  $t$  de 0,0001.

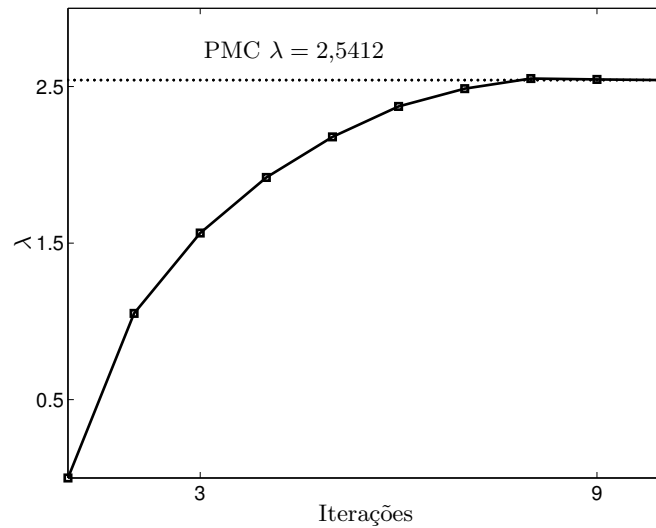


Figura 3.9: PMC - sistema de 2 barras

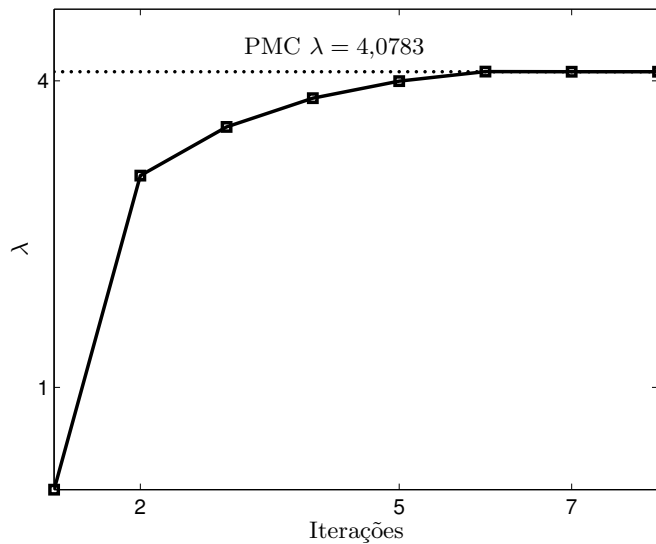


Figura 3.10: PMC - sistema IEEE 14 barras

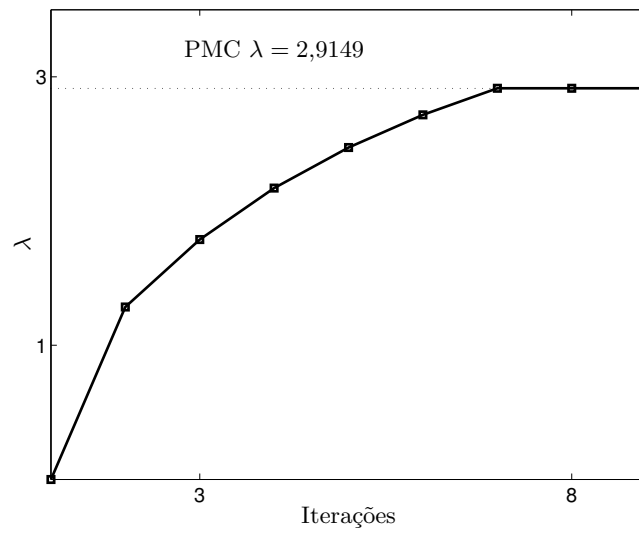


Figura 3.11: PMC - sistema IEEE 30 barras

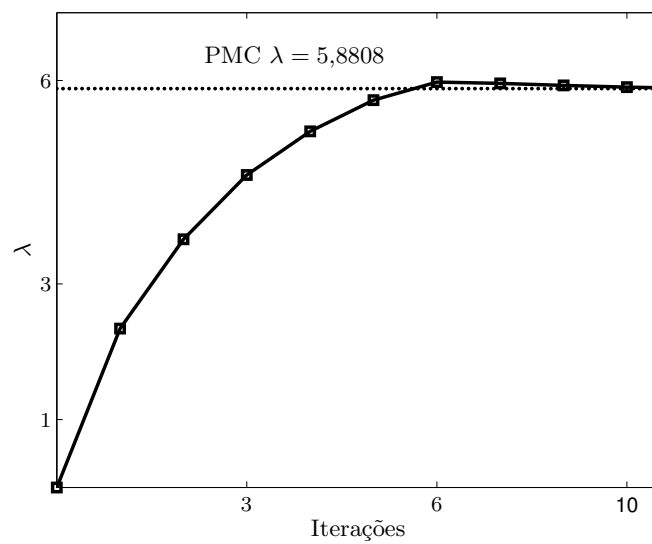


Figura 3.12: PMC - sistema IEEE 57 barras

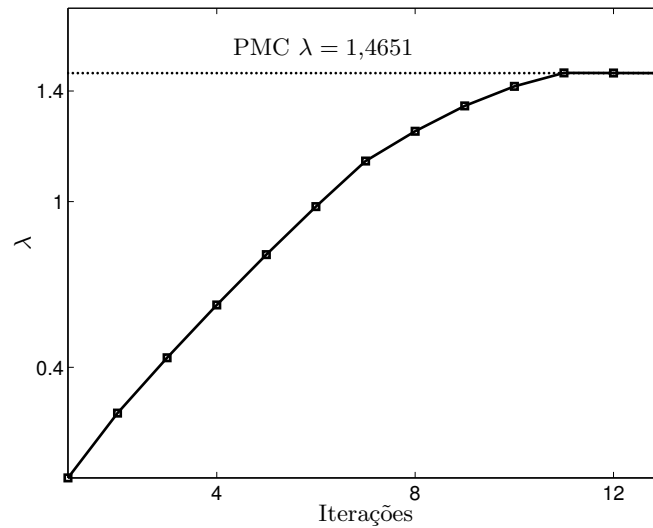


Figura 3.13: PMC - sistema IEEE 300 barras

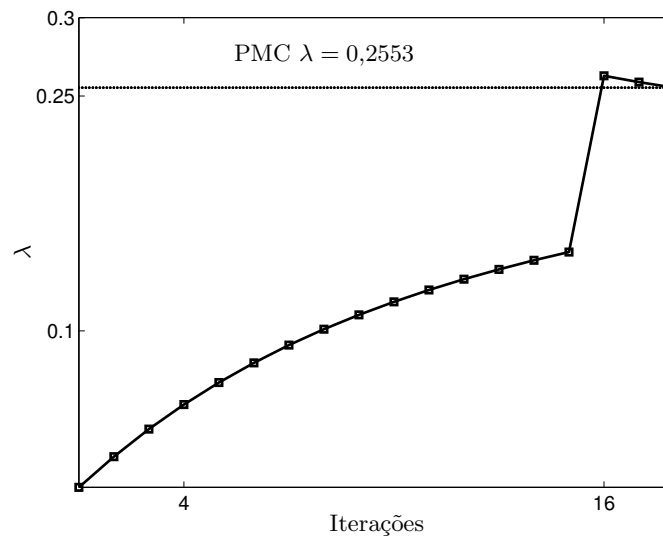


Figura 3.14: PMC - sistema 1081 barras

Neste capítulo foi apresentada uma metodologia para obter o PMC em sistemas elétricos de potência aplicando técnicas de programação não-linear e o fluxo de carga com otimização de passo. São ilustrados resultados para duas abordagens do problema: direção de incremento de carga com fator de potência constante ( $\alpha=\beta=1$ ) e direção de incremento de carga com fator de potência constante, vetor unitário. Embora o PMC ( $\lambda_*$ ) seja diferente para a mesma rede em cada situação, o ponto de operação é o mesmo. A margem obtida tem o mesmo valor nos dois casos. A utilidade do incremento de carga com vetor unitário será justificada no capítulo seguinte, onde novas direções de incremento de carga são calculadas usando vetores unitários.

## Capítulo 4

# Obtenção da margem mínima de estabilidade de tensão

Neste capítulo são apresentadas duas metodologias para obter a margem mínima de estabilidade de tensão. Inicialmente é explicada a idéia primária que inspirou este trabalho. Em seguida, são apresentadas duas metodologias modificadas para obter a margem mínima. Na primeira metodologia, recalcula-se a variável  $t$  de controle do tamanho do passo em cada nova iteração de incremento de carga. Os resultados obtidos com esta metodologia são apropriados, porém, muito conservadores. Uma segunda proposta é apresentada mantendo constante a variável de controle  $t$ , mas limitando o incremento de carga. Esta última resulta em um procedimento mais eficiente, que requer um menor número de iterações em todos os casos testados.

### 4.1 Metodologia proposta na literatura para obter a margem mínima de estabilidade de tensão

A metodologia proposta em [16], a qual inspirou a realização deste trabalho, será brevemente descrita com base na Figura 4.1. Ressalta-se que em [16] a simbologia é diferente da utilizada neste trabalho. Por exemplo, em [16]  $\lambda$  é o vetor de potências ativas e reativas, enquanto que neste trabalho  $\lambda$  é o escalar correspondente ao fator de carregamento. Outras grandezas serão definidas conforme aparecerem. Partindo do ponto de operação inicial ( $\lambda_o$ ) é definida uma direção inicial de incremento de carga ( $n_o$ ) que é equivalente ao autovetor esquerdo da matriz Jacobiana no caso base. Posteriormente, calcula-se o ponto de máximo carregamento ( $\lambda_1$ ) e uma nova direção de incremento de carga ( $n_1$ ) é definida na fronteira de factibilidade ( $\Sigma$ ). A partir do ponto de operação atual é feito o mesmo procedimento aumentando o carregamento na atual direção calculada ( $n_1$ ), novamente é obtido o PMC ( $\lambda_2$ ) e calculada uma nova direção de incremento de carga ( $n_{*-1}$ ) e assim sucessivamente até que a diferença entre  $n_*$  e  $n_{*-1}$  seja muito pequena. É importante ressaltar que a direção de incremento de carga  $n_{*-1}$  (para  $\lambda_{*-1}$ ) e  $n_*$  são praticamente paralelas.  $\lambda_*$  corresponde ao ponto de máximo carregamento na pior direção de incremento de carga  $n_*$  que corresponde à margem mínima. A instabilidade de tensão pode ser evitada monitorando a posição das potências (demanda em parâmetros de carga) desde o ponto de operação atual até a fronteira de estabilidade  $\Sigma$ .  $|\lambda_* - \lambda_o|$  é equivalente à diferença das injeções de potência e mede a proximidade ao colapso de tensão em uma direção de incremento de carga crítica em MVAr.  $\lambda_* \lambda_o$  representa a pior variação de incremento de carga.

Em [16] é usado um método direto para calcular os diferentes pontos de máximo carregamento. Entretanto, este método apresenta problemas de convergência e exige a resolução de um elevado número de equações. Além disso, o método direto é criticamente dependente do ponto inicial arbitrado e, dependendo desse ponto, pode divergir [17–19].

O método descrito no Capítulo 3 é o método adotado neste trabalho para encontrar os diferentes PMC. Como foi exposto anteriormente, este método não apresenta problemas de divergência nem para grandes passos de incremento de carga devido ao procedimento de corte de carga. O método da continuação também pode ser usado para encontrar os PMC. Porém, demanda um elevado número de iterações e em alguns casos pode divergir. Uma comparação entre os métodos da continuação e o método usado neste trabalho é apresentado na Tabela (5.6).

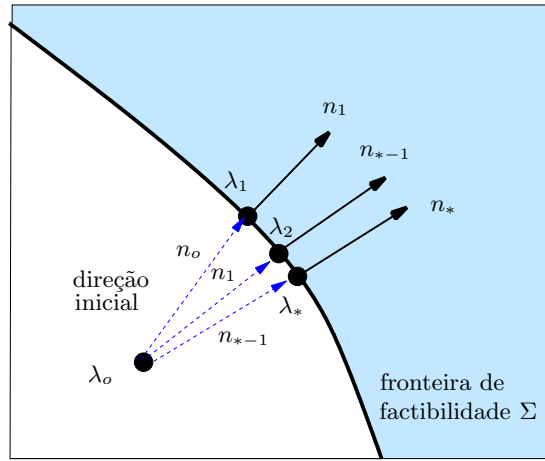


Figura 4.1: Obtenção da margem mínima de estabilidade de tensão

## 4.2 Definição da direção inicial de incremento de carga

O procedimento de obtenção da margem mínima de estabilidade de tensão (METm) sempre começa com a definição de uma direção inicial de incremento de carga. Em outras palavras, deve-se inicialmente determinar valores iniciais de  $\alpha$  e  $\beta$  de (3.2). Dois procedimentos diferentes são abordados neste trabalho.

A primeira direção inicial consiste em fazer  $\alpha_k = \beta_k = 1$ , para  $k = 1, \dots, n$ , ou seja, a carga aumentará com fator de potência constante, seguida de um aumento proporcional da geração. Esta direção conforme já comentado anteriormente, corresponde à direção que hoje é monitorada pelas empresas, em atendimento a exigências das agências reguladoras. O procedimento básico de obtenção da METm pode ser melhor entendido com a ajuda da Figura 4.2. Partindo do caso base ( $\lambda_0$ ), aumenta-se a carga até que o PMC ( $\lambda_1$ ) seja atingido ao longo da direção inicial. O autovetor esquerdo  $\omega$ , correspondente ao autovalor nulo da matriz Jacobiana calculada no PMC fornece a nova direção de aumento de carga, como será mostrado adiante. Então, são obtidos novos valores de  $\alpha$  e  $\beta$  e o processo é repetido até que dois autovetores consecutivos sejam paralelos. Nessa situação, tem-se a pior direção de aumento de carga ( $\alpha$  e  $\beta$ ) e o pior PMC ( $\lambda_*$ ).

A segunda direção inicial (proposta em [16]) consiste em calcular os valores iniciais de  $\alpha$  e  $\beta$  com base no autovetor esquerdo correspondente ao menor autovalor da matriz Jacobiana calculada

no caso base. O procedimento básico não muda e é ilustrado na Figura 4.3. As Figuras 4.2 e 4.3 são similares. O ponto  $\lambda_*$  é o mesmo em ambas as situações, porém, o número de passos necessários para chegar nele é menor para a segunda direção inicial.

Deve-se observar que a barra para a qual tem-se o menor autovalor da matriz Jacobiana no caso base pode ser diferente daquela no PMC. Isto significa que há a possibilidade teórica de que seja obtida uma direção inicial que dificulte o processo de convergência, ou ainda, que leve a um ponto de margem mínima sem significado prático, como por exemplo barras de carga serem transformadas em barras de geração.

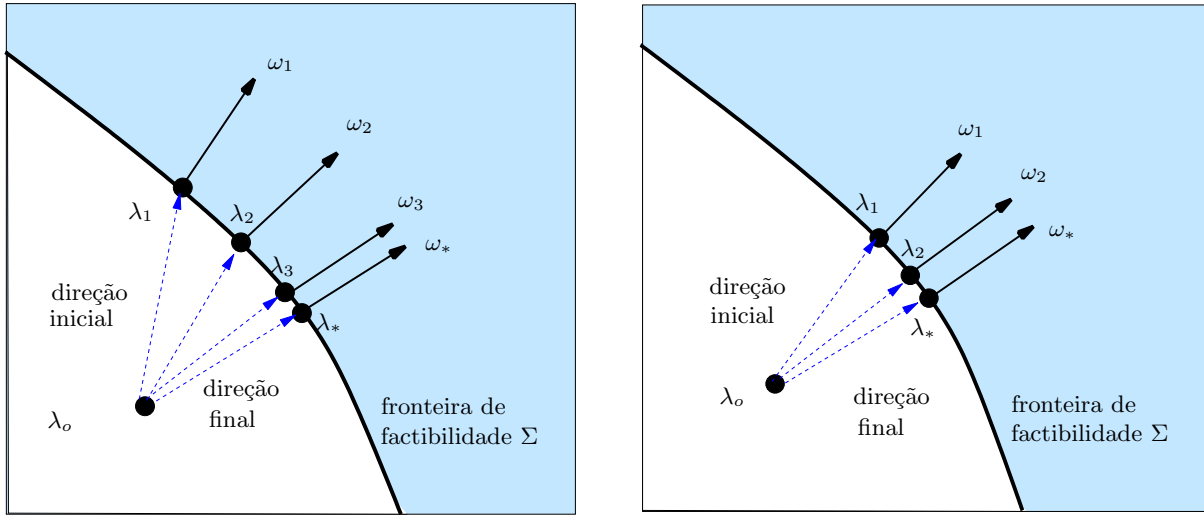


Figura 4.2: Caso A: procedimento para fator de Figura 4.3: Case B: procedimento adotado em [16]

No caso da Figura 4.4 o fator de carregamento  $\lambda_0$  corresponde ao caso base.  $\lambda_1$  representa o PMC para a direção de incremento de carga com fator de potência constante.  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  correspondem ao mínimo local e ao mínimo global, respectivamente. A idéia deste trabalho é encontrar  $\lambda_2$ , o pior cenário de incremento de carga na vizinhança da direção convencional de incremento de carga. Embora  $\lambda_3$  corresponda ao mínimo global, esta direção de incremento de carga pode carecer de significado prático. Por exemplo, esta direção de incremento de carga poderia ter algumas barras de geração transformadas em barras de carga, o que não ocorre na prática.

### 4.3 Obtenção da margem mínima: idéia geral

Devido às diferentes direções de incremento de carga é indispensável definir a margem de estabilidade (MET) em termos do carregamento  $\lambda$  e de tais direções. A MET é definida, então, como a norma de um vetor composto pela diferença entre as injeções das potências em cada barra no ponto de máximo carregamento PMC e no caso base. A MET pode ser definida como:

$$\text{MET} = \lambda^* \cdot \left\| \left[ \cdots \alpha_k P_k^{sch} \cdots \beta_k Q_k^{sch} \cdots \right] \right\|_2 . \quad (4.1)$$

A MET definida na expressão (4.1) é equivalente a avaliar a diferença entre as injeções de potências entre o PMC e o caso base. Em espaço de parâmetros de carga a MET corresponde à



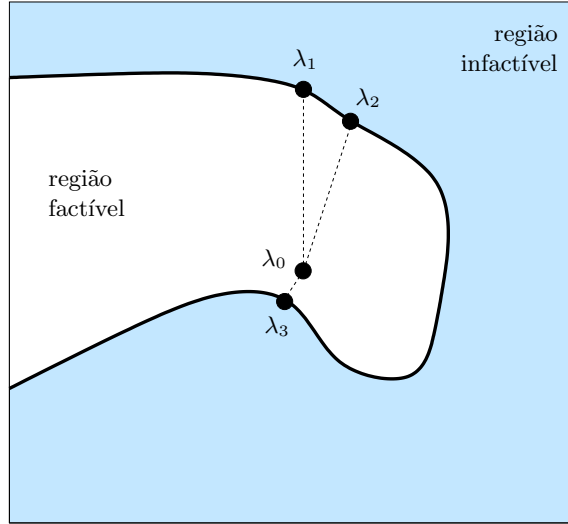


Figura 4.4: Local e global METm

distância desde o PMC até o caso base, conhecida como a margem de estabilidade de tensão, dada pela expressão (4.2) [16]:

$$\text{MET} = \| [\cdots (P_k^* - P_k^o) \cdots (Q_k^* - Q_k^o) \cdots] \|_2 \quad (4.2)$$

em que  $P_k^*$  e  $P_k^o$  correspondem às injeções de potência ativa das barras PQ e PV, no PMC e no caso base respectivamente.  $Q_k^*$  e  $Q_k^o$  correspondem às injeções de potência reativa no PMC e no caso base respectivamente das barras PQ.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam uma rede de duas barras (barra de geração e barra de carga conectadas por uma linha de transmissão) e o espaço em parâmetros de carga correspondente, respectivamente. O espaço de parâmetros de carga é expresso em função das potências  $P_2$  e  $Q_2$ . O ponto de operação **I** refere-se ao caso base. Os outros pontos de operação (**II**, **III** e **IV**) são pontos de máximo carregamento para diferentes direções de incremento de carga. O ponto de operação **II** corresponde ao PMC para direção de incremento de carga com fator de potência constante. O ponto de operação **III** corresponde ao PMC para uma direção de incremento de carga avaliando o autovetor esquerdo ( $\omega$ ) da matriz Jacobiana no caso base. O ponto de operação **IV** corresponde ao PMC na pior direção de incremento de carga ou direção crítica e, conseqüentemente, à margem mínima de estabilidade de tensão (METm).

Tanto a direção **II-I**, quanto a direção **III-I** podem ser usadas para obter a margem mínima **IV**. Como será mostrado adiante, o valor da margem obtido é o mesmo. A diferença consiste no caminho para chegar na pior direção de incremento de carga, sendo mais eficiente para a opção **III-I**. Deve ser notado que a fronteira de factibilidade pode ser irregular, o que dificulta em alguns casos seu esboço. Esta situação ocorre no caso das redes IEEE 57 e 300 barras.

A margem pode ser facilmente calculada, por exemplo, para o caso de duas barras e direção de incremento com fator de potência constante, como:

$$\text{MET} = \lambda_{II} \cdot \| [\alpha_2 P_2^{sch} \quad \beta_2 Q_2^{sch}] \|_2 = \| [P_2^{II} - P_2^o \quad Q_2^{II} - Q_2^o] \|_2 \quad .$$

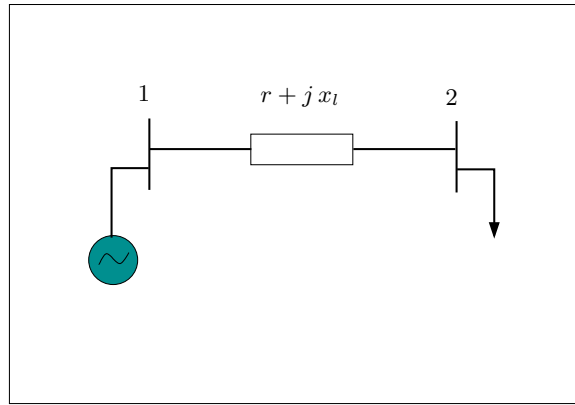


Figura 4.5: Rede de 2 barras

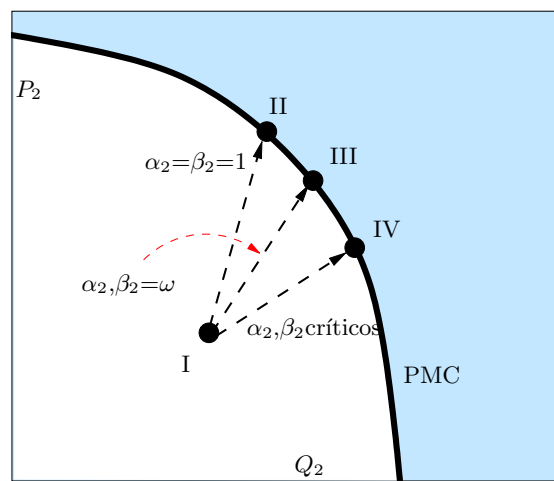


Figura 4.6: Espaço de parâmetros de carga para a rede de 2 barras

De acordo com [16], o PMC é dado por:

$$\lambda_* = \lambda_0 + \mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_*, \quad (4.3)$$

(é importante lembrar que para as expressões (4.3) e (4.4) a nomenclatura é diferente da adotada neste trabalho)

em que  $\lambda_*$  equivale às injeções de potências (P,Q) no PMC,  $\lambda_0$  equivale às injeções de P e Q no caso base,  $\mathbf{n}$  é a direção de incremento de carga, e  $\mathbf{l}_*$  é o fator de carregamento no PMC.

A direção de incremento de carga  $\mathbf{n}$  é dada por:

$$\mathbf{n} = \omega \mathbf{f}_\lambda. \quad (4.4)$$

em que  $\mathbf{f}_\lambda$  é a derivada das equações de fluxo de carga com relação às potências. De acordo com o modelo adotado em [16],  $\mathbf{f}_\lambda$  é igual à matriz identidade, logo,

$$\mathbf{n} = \omega. \quad (4.5)$$

Tomando somente a expressão da potência ativa de (4.3), tem-se

$$\mathbf{P}_* = \mathbf{P}_0 + \boldsymbol{\omega} l_*. \quad (4.6)$$

Neste caso  $l_*$  equivale ao carregamento no PMC, e  $\boldsymbol{\omega}$  equivale ao autovetor esquerdo da matriz Jacobiana. Logo:

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{\mathbf{P}_* - \mathbf{P}_0}{l_*}. \quad (4.7)$$

Do modelo de fluxo de carga adotado neste trabalho dado pela Equação (3.2), tem-se

$$\begin{cases} (1 + \alpha \lambda) P^{sch} - P^c = 0, \\ (1 + \beta \lambda) Q^{sch} - Q^c = 0. \end{cases}$$

Tomando as equações das potências no PMC, tem-se:

$$(1 + \alpha \lambda_*) P^{sch} - P^c = 0, \quad (4.8)$$

$$P^{sch} + \alpha \lambda_* P^{sch} - P^c = 0, \quad (4.9)$$

onde  $P^{sch}$  é a potência especificada no caso base,  $\lambda_*$  é o fator de carregamento no PMC e  $P^c$  é a potência calculada. De (4.9):

$$\alpha \lambda_* P^{sch} = P^c - P^{sch}. \quad (4.10)$$

A potência calculada  $P^c$  corresponde à potência no PMC ou  $P_*$ .  $P^{sch}$  pode ser expressa como  $P_0$  (potência especificada no caso base), e:

$$\alpha \lambda_* P^{sch} = P_* - P^{sch}, \quad (4.11)$$

$$\alpha P^{sch} = \frac{P_* - P_0}{\lambda_*}. \quad (4.12)$$

Igualando as equações (4.7) e (4.12) e lembrando que  $l_* = \lambda_*$ , obtém-se

$$\boldsymbol{\omega} = \alpha P^{sch}, \quad (4.13)$$

e, então:

$$\alpha = \frac{\boldsymbol{\omega}}{P^{sch}}. \quad (4.14)$$

Da mesma forma, pode ser obtida a direção para a expressão de potência reativa:

$$\beta = \frac{\omega}{Q_{sch}}. \quad (4.15)$$

De modo geral, a direção de incremento de carga pode ser expressa como:

$$\alpha = \frac{\omega}{P_{sch}}, \quad \beta = \frac{\omega}{Q_{sch}}. \quad (4.16)$$

Para obter a margem mínima de estabilidade de tensão, usa-se a idéia apresentada em [16] e [17] seguindo os seguintes passos: **(1)** Selecionar uma direção de incremento de carga de acordo com o conjunto de equações mostrado em (3.2); **(2)** obter o PMC nesta direção de incremento de carga; **(3)** a partir da informação deste ponto de operação onde o PMC é encontrado calcular uma nova direção de incremento de carga e voltar ao passo **(2)**. O processo iterativo é executado até que a margem mínima seja obtida. A Figura 4.7 mostra a idéia global da metodologia. Depois de definir uma direção inicial de aumento de carga, o PMC ( $\lambda_1$ ) é calculado para esta direção usando a metodologia apresentada no Capítulo 3. Para definir a direção de incremento de carga é calculado o autovetor esquerdo ( $\omega_1$ ) da matriz Jacobiana correspondente ao menor autovalor. Como ( $\lambda_1$ ) está na fronteira de factibilidade a matriz Jacobiana neste ponto de operação está próxima da singularidade. Conforme mostrado anteriormente, a direção de incremento de carga para cada barra é obtida baseada na expressão (4.16):

$$\alpha_k = \frac{\omega_k^P}{P_k^{sch}} \quad \text{e} \quad \beta_k = \frac{\omega_k^Q}{Q_k^{sch}}, \quad (4.17)$$

onde  $\omega_k^P$  e  $\omega_k^Q$  correspondem aos elementos do autovetor  $\omega$  com relação à potência ativa e reativa de cada barra  $k$ . Começando novamente a partir do ponto de operação inicial ( $\lambda_0$ ) e executando o mesmo processo até que o ponto de operação na fronteira de factibilidade corresponda à margem mínima. Neste caso, o autovetor será colinear com a direção de aumento de carga e os autovetores atual e anterior serão paralelos.

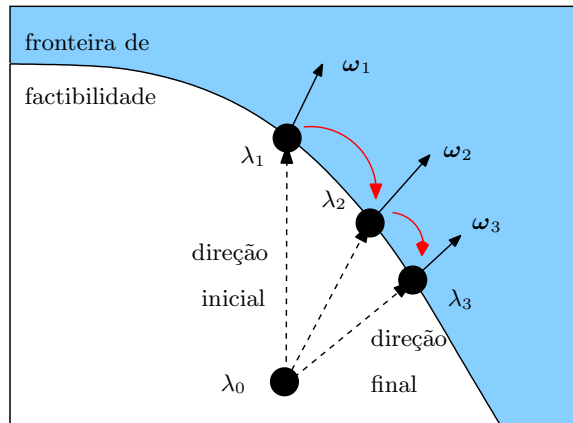


Figura 4.7: Obtenção da margem mínima

Tomando a Figura 4.7 como exemplo, a distância entre o ponto de operação na fronteira de factibilidade ( $\lambda_3$ ) e o caso base ( $\lambda_0$ ) corresponde à METm.

## 4.4 Controle do passo para cada incremento de carga

Cada variação na direção de incremento de carga produz uma modificação no PMC. Devido aos valores decrescentes da margem mínima para cada nova direção de incremento de carga, o processo de incremento de carga descrito no Capítulo 3 pode conduzir a valores de  $\Delta\lambda$  excessivamente grandes, levando o sistema a operar na região infatível, e muito longe da fronteira de factibilidade. Isto acontece quando o parâmetro heurístico  $t$  é mantido constante para todas as direções de incremento de carga. Uma opção seria definir o parâmetro  $t$  manualmente em cada nova direção de incremento de carga, o que não é prático. Tomando como exemplo a Figura 4.7, para cada direção de incremento de carga deveria ser escolhido um valor de  $t$  para que o processo fosse eficiente.

A partir das equações (3.10) e (3.11), um novo valor para o escalar  $t$  é calculado para cada direção de incremento de carga limitando assim um excessivo incremento de carga. Logo,  $t$  é dado por:

$$t = -\lambda^{\max} \cdot \|g_\lambda\|_2 \cdot \left[ \frac{(g_\lambda^T)(g_x^T)^{-1}(f_x)}{f(x, \lambda)} \right], \quad (4.18)$$

onde  $\lambda^{\max}$  corresponde ao fator de carregamento calculado na direção de incremento de carga anterior, e as outras grandezas são calculadas para o caso base.  $t$  é calculado de forma que  $\lambda$  na nova direção de incremento de carga nunca seja maior que o máximo  $\lambda$  da iteração anterior.

Simulações e testes mostraram que a expressão (4.18) permite calcular a margem mínima de estabilidade de tensão de forma eficaz, apresentando resultados muito precisos, embora para alguns sistemas possa demandar um elevado número de iterações em cada direção de incremento de carga, tornando o processo muito conservador.

Outra alternativa que fornece melhores resultados consiste em manter o escalar  $t$  constante durante o processo todo, enquanto o valor de  $\Delta\lambda$  é limitado a partir da primeira direção de incremento de carga.  $\lambda^{\eta+1}$  é calculado inicialmente com a expressão (3.10). O valor de  $\Delta\lambda$  é limitado e não pode ultrapassar o valor de  $\lambda^{\eta+1}$  calculado na primeira direção de incremento de carga. Tomando a Figura (4.7), o  $\Delta\lambda$  na segunda direção de incremento de carga não pode ultrapassar o valor  $\gamma\lambda_1$ . Neste caso, aparece um fator  $\gamma$  que freqüentemente é igual a um e, em alguns casos, pode ser ajustado para fornecer resultados ainda mais eficientes.

Este procedimento é vantajoso para limitar excessivos incrementos de carga nas primeiras iterações. O valor do vetor tangente (3.11) torna-se maior à medida que o sistema se aproxima da fronteira de factibilidade, reduzindo deste modo os passos de incremento de carga.

Uma limitação no carregamento  $\lambda^{\eta+1}$  mostrou-se adequada, especialmente nos casos das redes muito carregadas. A margem de estabilidade MET é calculada para determinada direção de incremento de carga, e esta é armazenada  $MET_*$ . A direção de incremento de carga seguinte  $\lambda^{\eta+1}$  é calculada com a expressão (4.1), sendo a margem atual MET igual à margem anterior  $MET_*$ . Caso a margem atual MET seja maior do que a margem anterior  $MET_*$ , o carregamento  $\lambda^{\eta+1}$  calculado com a expressão (3.10) não é adotado, e usa-se a informação obtida no passo anterior para o cálculo do novo carregamento.

Resumindo:

- (1) Estimar  $\lambda^{\eta+1}$  com a expressão (3.10);
- (2) Se  $\lambda^{\eta+1} > \lambda_1$  então  $\lambda^{\eta+1} = \lambda_1$ . Caso contrário, continuar;

- (3) Calcular ( $MET$ ) usando  $\lambda^{\eta+1}$ ;
- (4) Comparar as margens. Se  $MET > MET_*$  então recalcular o novo carregamento

$$\lambda = \frac{MET_*}{\| [\dots \alpha_k P_k^{sch} \dots \beta_k Q_k^{sch} \dots] \|_2}. \quad (4.19)$$

## 4.5 Algoritmo básico

A margem mínima de estabilidade de tensão pode ser calculada de acordo com os seguintes passos:

- (1) Obter o ponto de operação do sistema para o caso base ( $\lambda_0$ ).
- (2) Definir uma direção inicial de incremento de carga.  $\alpha_k = \beta_k$  (fazendo-se o vetor  $[\alpha \ \beta]$  unitário) ou valores de  $\alpha_k \ \beta_k$  iguais aos valores do autovetor esquerdo  $\omega$  correspondente ao menor autovalor da matriz Jacobiana avaliada no caso base.
- (3) Obter o PMC correspondente à direção inicial de incremento de carga.
- (4) Calcular o autovetor esquerdo correspondente ao PMC.
- (5) Atualizar  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  com a expressão (4.17).
- (6) Obter o PMC correspondente à nova direção de incremento de carga, considerando o controle do passo para cada direção de incremento de carga como mostrado na Seção (4.4) deste capítulo.
- (7) Obter o autovetor atual e anterior. Se os dois são paralelos, parar o processo. A distância desde o caso base  $\lambda_0$  até o PMC atual é definida como a margem mínima de estabilidade de tensão  $MET_m$ . Uma tolerância de 0,005 é definida para avaliar a diferença entre a margem atual e a anterior. Este valor é apropriado para situações práticas.
- (8) Repetir os passos de (4) a (7) até atingir convergência.

## 4.6 Resultados

### 4.6.1 Margem mínima

A Tabela (4.1) mostra os resultados para as diferentes redes testadas. São incluídos os valores das margens calculadas, o ponto de máximo carregamento, o número de iterações, tanto do processo de incremento de carga quanto de corte de carga, e o cálculo do escalar  $t$ . O passo 1 corresponde à direção inicial de incremento de carga, o valor de  $t$  neste passo é definido heurísticamente enquanto que para os seguintes passos é calculado pela expressão (4.18). O valor de  $t$  não deve ser maior do que o usado na direção anterior de incremento de carga porque isto poderia acarretar em incrementos de carga excessivamente grandes levando o sistema para a região infactível muito longe da fronteira. Caso contrário, será considerado o  $t$  da direção anterior. Para alguns sistemas, como no caso dos de 2, 300 e 1081 barras, 4 passos iterativos foram necessários para obter a margem mínima, enquanto para as outras redes 3 passos foram necessários. Embora os valores da Tabela (4.1) mostrem robustez

e precisão, o método deve ser mais eficiente porque para alguns sistemas são requeridas muitas iterações no processo de incremento de carga. A rede de 14 barras no passo iterativo 3 apresenta a situação mais crítica, onde 40 iterações são necessárias. O PMC em cada passo iterativo poderia ser calculado com maior precisão ainda, o que requeriria um maior número de iterações no processo de corte de carga, apesar de que os resultados obtidos são adequados para aplicações práticas.

Tabela 4.1: Margem Mínima - fator de potência constante

Sistema	Item	Passo 1	Passo 2	Passo 3	Passo 4	Total it.
2 barras	MET	0,7389	0,6185	0,6116	<b>0,6112**</b>	29
	PMC	2,5412	1,9037	1,9565	1,9690	
	it. incremento de carga	7	3	1	1	
	it. corte de carga	2	2	5	8	
	$t$	0,05	0,05	0,05	0,05	
14 barras	MET	0,8946	0,3422	<b>0,3402**</b>		77
	PMC	4,0783	9,3908	10,3399		
	it. incremento de carga	5	26*	40*		
	it. corte de carga	2	2	2		
	$t$	0,03	0,0022	0,0017		
30 barras	MET	0,4140	0,1521	<b>0,1505**</b>		35
	PMC	2,9149	7,5431	8,0037		
	it. incremento de carga	6	5	18*		
	it. corte de carga	2	2	2		
	$t$	0,01	0,0015	0,0011		
57 barras	MET	1,9448	0,0889	<b>0,0841**</b>		46
	PMC	5,8808	4,7883	5,1379		
	it. incremento de carga	6	2	1		
	it. corte de carga	4	15*	18*		
	$t$	0,01	0,001	0,0007		
300 barras	MET	3,0041	0,0656	0,0384	<b>0,0376**</b>	86
	PMC	1,4651	5,5138	6,8993	6,8820	
	it. incremento de carga	10	8	28*	31*	
	it. corte de carga	2	3	2	2	
	$t$	0,01	0,0067	0,00065	0,00052	
1081 barras	MET	0,2197	0,2020	0,1876	<b>0,1832**</b>	47
	PMC	0,2553	2,1148	1,9903	1,9428	
	it. incremento de carga	15	8	8	8	
	it. corte de carga	2	2	2	2	
	$t$	0,0005	0,00010	0,00010	0,00010	

\* indica que foi necessário um elevado número de iterações para obter o PMC.

\*\* corresponde à margem mínima METm.

#### 4.6.2 Diferentes valores de $\alpha_k$ e $\beta_k$

A direção inicial de incremento de carga pode ser definida como no caso anterior, onde  $[\alpha \ \beta] = 1$  (vetor unitário), ou seja, com fator de potência constante, segundo os requerimentos das

agências encarregadas da operação e do planejamento do sistema elétrico. Outra forma de definir a direção inicial de incremento de carga, como explicado anteriormente, é baseada na informação do autovetor esquerdo da matriz Jacobiana avaliada no caso base [16].

Esta última abordagem do problema apresenta vantagens em relação à anterior. Como é mostrado na Tabela (4.2), o número de iterações do processo de incremento de carga diminui notoriamente, resultando em um grande número de iterações apenas para a rede de 14 barras nos passos iterativos 2 e 3. No caso das redes de 2 e 300 barras o número de passos diminui de 4 para 3 e no caso da rede de 1081 barras diminui de 4 para 2 passos, melhorando notavelmente a eficiência do método. A margem mínima é obtida com precisão e maior eficiência.

Tabela 4.2: Margem Mínima - Diferentes valores de  $\alpha_k$  e  $\beta_k$

Sistema	Item	Passo 1	Passo 2	Passo 3	Total it.
2 barras	MET	0,6305	0,6123	<b>0,6113**</b>	23
	PMC	1,8577	1,9435	1,9656	
	it. incremento de carga	5	2	2	
	it. corte de carga	3	6	5	
	$t$	0,05	0,049	0,042	
14 barras	MET	0,4123	0,3428	<b>0,3428**</b>	58
	PMC	5,8927	9,3630	10,3195	
	it. incremento de carga	7	18*	26*	
	it. corte de carga	3	2	2	
	$t$	0,015	0,0034	0,0022	
30 barras	MET	0,1732	0,1508	<b>0,1515**</b>	30
	PMC	4,3088	7,3251	8,0531	
	it. incremento de carga	3	8	11	
	it. corte de carga	4	2	2	
	$t$	0,01	0,0022	0,0017	
57 barras	MET	0,1118	0,0837	<b>0,0834**</b>	32
	PMC	4,1137	4,7959	5,0297	
	it. incremento de carga	5	8	13	
	it. corte de carga	2	2	2	
	$t$	0,003	0,00086	0,00062	
300 barras	MET	0,0793	0,0383	<b>0,0378**</b>	22
	PMC	4,9605	6,8751	6,9326	
	it. incremento de carga	3	6	7	
	it. corte de carga	2	2	2	
	$t$	0,02	0,0024	0,0018	
1081 barras	MET	0,1901	<b>0,1864**</b>		20
	PMC	8,3998	2,2120		
	it. incremento de carga	7	9		
	it. corte de carga	2	2		
	$t$	0,0001	0,0001		

\* indica que foi necessário um elevado número de iterações para obter o PMC.

\*\* corresponde à margem mínima METm.



### 4.6.3 Limitando o tamanho do passo de incremento de carga $\Delta\lambda$

As simulações mostradas nos casos anteriores foram feitas recalculando o escalar  $t$  para cada passo iterativo que corresponde a cada direção de incremento de carga. Embora o método seja robusto e preciso, ainda demanda um número elevado de iterações para algumas redes. Neste caso,  $t$  é mantido constante durante o processo todo e o valor do incremento de carga  $\Delta\lambda$  é limitado como se propõe na Seção 4.2. Os resultados são mostrados na Tabela (4.3). O método resultou ser o mais eficiente, não apresenta um elevado número de iterações no processo de incremento de carga como nos casos anteriores e a margem é calculada com precisão.

Tabela 4.3: Margem Mínima – Limitando o tamanho de passo de incremento de carga  $\Delta\lambda$  e mantendo  $t$  constante

Sistema	Item	Passo 1	Passo 2	Passo 3	Total it.
2 barras $t = 0,05$	MET	0,6305	0,6123	<b>0,6113**</b>	18
	PMC	1,8577	1,9426	1,9659	
	it. incremento de carga	5	2	1	
	it. corte de carga	3	4	3	
14 barras $t = 0,015$	MET	0,4123	0,3416	<b>0,3410**</b>	23
	PMC	5,8927	9,3406	10,3174	
	it. incremento de carga	7	2	4	
	it. corte de carga	3	2	5	
30 barras $t = 0,01$	MET	0,1732	0,1506	<b>0,1504**</b>	17
	PMC	4,3088	7,4246	8,0005	
	it. incremento de carga	3	2	2	
	it. corte de carga	4	3	3	
57 barras $t = 0,003$	MET	0,1118	0,0849	<b>0,0848**</b>	17
	PMC	4,1137	5,2220	5,4486	
	it. incremento de carga	5	2	2	
	it. corte de carga	2	3	3	
300 barras $t = 0,02$	MET	0,0793	0,0383	<b>0,0376**</b>	25
	PMC	4,9605	6,8741	6,9743	
	it. incremento de carga	3	2	2	
	it. corte de carga	2	8	8	
1081 barras $t = 0,0001$	MET	0,1901	<b>0,1864**</b>		20
	PMC	8,3998	2,2120		
	it. incremento de carga	7	9		
	it. corte de carga	2	2		

\*\* corresponde à margem mínima METm.

As Figuras 4.8 a 4.10 mostram uma comparação entre os dois métodos descritos anteriormente para as redes de 2, 14 e 300 barras respectivamente. Para o caso da direção inicial de incremento de carga baseada na informação do autovetor esquerdo avaliado no caso base (diferentes valores de  $\alpha_k$  e  $\beta_k$ ), o processo resultou ser mais eficiente do que o método utilizando fator de potência constante.

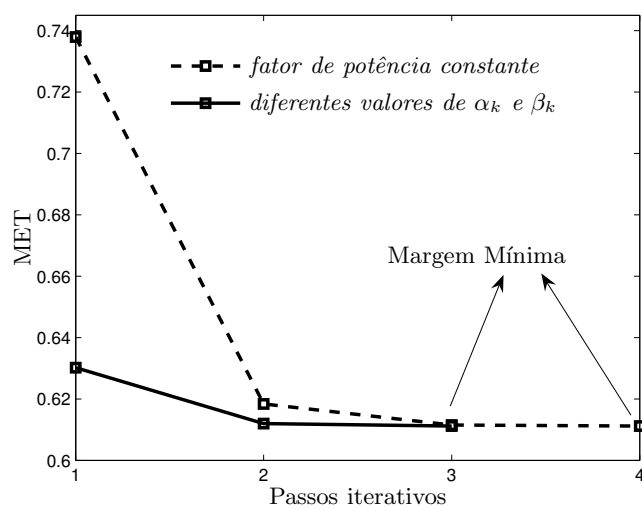


Figura 4.8: Margem mínima - sistema de 2 barras

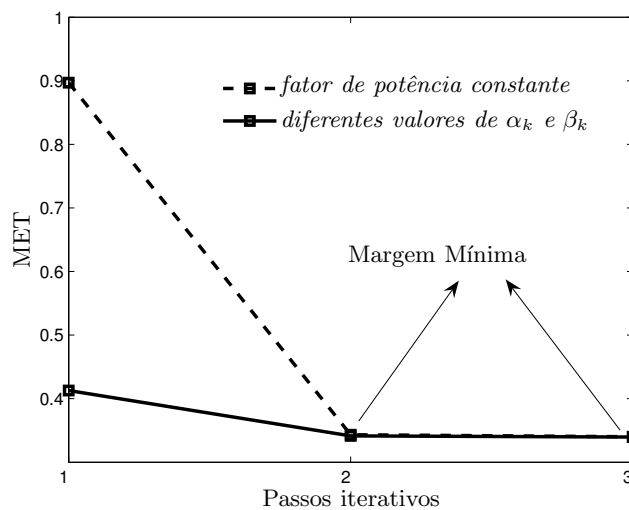


Figura 4.9: Margem mínima - sistema IEEE 14 barras

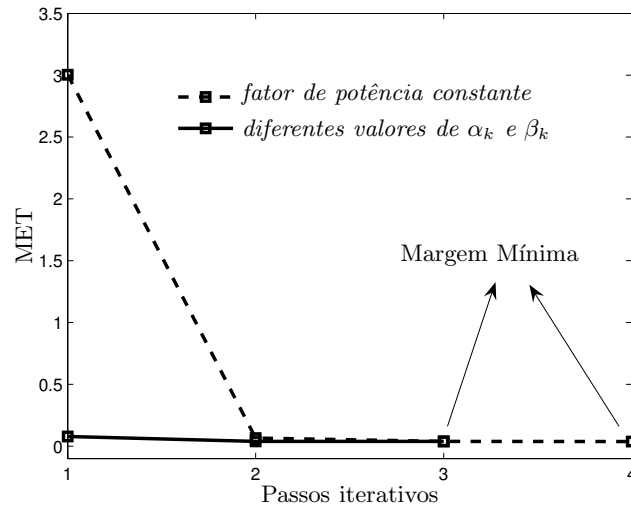


Figura 4.10: Margem mínima - sistema IEEE 300 barras

Foram implementadas duas metodologias para calcular a margem mínima de segurança de estabilidade de tensão de sistemas de potência. A primeira recalculando o parâmetro heurístico  $t$  que controla o tamanho do passo em cada nova direção de incremento de carga. A segunda metodologia, mantendo o  $t$  constante e limitando o incremento de carga  $\Delta\lambda$ , resultando em um processo mais eficiente. Ambas metodologias podem ser avaliadas usando duas abordagens, definindo a direção inicial de incremento de carga para fator de potência constante  $\alpha = \beta = 1$ , ou calculando o autovetor esquerdo  $\omega$  da matriz Jacobiana no caso base. O uso desta última abordagem resulta em um menor número de iterações.

## Capítulo 5

# Novos métodos para obter a margem mínima de estabilidade de tensão

Neste capítulo são apresentadas novas metodologias para calcular a margem mínima de estabilidade de tensão METm. Neste caso, são evitados inconvenientes de ajustes do parâmetro heurístico  $t$  e limitações nos incrementos de carga como foi apresentado no capítulo anterior. A METm pode ser obtida para uma direção inicial de incremento de carga, tanto para fator de potência constante, quanto para fator de potência variável.

### 5.1 Método A - descrição geral

Esta parte do trabalho apresenta uma nova metodologia para obter a margem mínima de segurança de estabilidade de tensão de sistemas elétricos de potência (METm) e a correspondente direção de incremento de carga. Inicialmente, deve-se calcular o ponto de máximo carregamento (PMC) para uma direção de incremento de carga. Esta direção pode ser para fator de potência constante ou variável. No caso de direção de fator de potência constante o incremento de carga é feito para acréscimos de carga ativa e reativa em iguais proporções, sendo esta a direção de incremento de carga que as agências habitualmente monitoram. No caso de direção de incremento de carga para fator de potência variável aproveita-se a informação do autovetor esquerdo para o caso base. O PMC é calculado usando os procedimentos de incremento de carga e corte de carga apresentados no Capítulo 3. Logo, são calculadas novas direções de incremento de carga baseadas no autovetor esquerdo. Para esta nova direção parte-se do mesmo nível de carregamento máximo da direção anterior, e não do caso base. Como este novo ponto de operação é infactível, é aplicado o procedimento de corte de carga até calcular um novo PMC e a correspondente MET na fronteira de factibilidade. Calcula-se um novo autovetor esquerdo e aplica-se o mesmo procedimento até que a diferença entre os autovetores seja muito pequena, menor que um critério de convergência, neste caso o critério de convergência é 0,005. Quando o critério de convergência é atingido, calcula-se a nova MET, que corresponde à METm.

Esta nova metodologia é baseada em [9, 16, 17]. Este método é rápido, eficiente e preciso sendo apropriado para aplicações em tempo real tais como o monitoramento e controle de sistemas de potência. A Figura 5.1 descreve a idéia geral do método. A partir do ponto de operação atual  $\lambda_0$  é escolhida uma direção inicial de incremento de carga. Utilizando os procedimentos de incremento e corte de carga calcula-se o ponto de operação  $\lambda_1$ . Usando a expressão (5.1) a MET é:

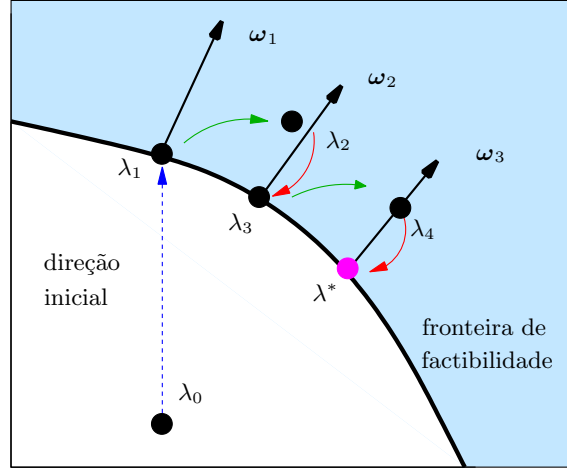


Figura 5.1: Obtenção da margem mínima - método A

$$\text{MET}_1 = \lambda_1 \cdot \left\| \begin{bmatrix} \dots & \alpha_i P_i^{sch} & \dots & \beta_i Q_i^{sch} & \dots \end{bmatrix} \right\|_2. \quad (5.1)$$

O ponto de operação  $\lambda_1$  está perto da fronteira de factibilidade, por conseguinte, a matriz Jacobiana está próxima da singularidade. Calcula-se o autovetor esquerdo correspondente ao menor autovetor (próximo de zero). A nova direção de incremento de carga é calculada do mesmo modo que no capítulo anterior com a expressão (4.17). O próximo passo é calcular a nova margem correspondente à nova direção de incremento de carga. Neste caso, com o objetivo de diminuir o esforço computacional, não é necessário retornar até o ponto de operação inicial (caso base  $\lambda_0$ , como é feito no capítulo anterior). O próximo ponto de operação  $\lambda_2$  é calculado com a equação (5.2).

$$\lambda_2 = \gamma \frac{\text{MET}_1}{\left\| \begin{bmatrix} \dots & \alpha_i P_i^{sch} & \dots & \beta_i Q_i^{sch} & \dots \end{bmatrix} \right\|_2}, \quad (5.2)$$

$\gamma$  é um escalar que usualmente é igual a 1, entretanto, em alguns casos pode ser ajustado para prover resultados mais eficientes reduzindo o número de iterações no procedimento de corte de carga. É importante notar que  $\lambda_2$  é avaliado para o mesmo valor da MET correspondente a  $\lambda_1$ .  $\lambda_2$  corresponde a um ponto de operação na região infactível, visto que a nova direção de incremento de carga é calculada com a finalidade de encontrar um valor menor para MET. Para obter o ponto de operação  $\lambda_3$  na fronteira de factibilidade, somente é necessário aplicar o procedimento de corte de carga. Deste modo, o procedimento de incremento de carga apenas é necessário na primeira direção de incremento de carga, desde o caso base  $\lambda_0$  até  $\lambda_1$ . Este método resultou mais eficiente do que os métodos propostos antes, pois na maioria dos casos o número de iterações é menor no processo de obtenção da margem mínima.

O procedimento é repetido até que a diferença entre os elementos de dois autovetores consecutivos seja menor que uma tolerância predefinida, neste caso igual a 0,005. Neste caso,  $\lambda_*$  é a solução, os autovetores  $\omega_2$  e  $\omega_3$  são paralelos e a margem que é calculada para este ponto de operação corresponde à margem mínima.

O processo pode ser descrito como segue.

- (1) Obter o ponto de operação atual da rede (caso base).

- (2) Definir uma direção inicial de incremento de carga.
- (3) Avaliar o PMC e a MET que corresponde à direção inicial de incremento de carga.
- (4) Calcular o autovetor esquerdo correspondente ao PMC.
- (5) Calcular novos valores de  $\alpha_i$  e  $\beta_i$  de acordo com (4.17).
- (6) Estimar um novo ponto de operação usando a equação (5.2). Este é um ponto de operação na região infactível.
- (7) Aplicar o procedimento de corte de carga para encontrar um ponto de operação na fronteira de factibilidade.
- (8) Avaliar os dois últimos autovetores calculados até que eles sejam paralelos. A distância desde o caso base ( $\lambda_0$ ) até o atual ponto de operação (PMC) corresponde à margem mínima METm. No caso que os dois últimos autovetores não sejam paralelos, retornar ao passo (4).

## 5.2 Resultados

Os resultados serão mostrados para a direção inicial de incremento de carga com fator de potência constante (vetor unitário) e para a direção inicial baseada na informação do autovetor esquerdo avaliado no caso base. Esta última resultou mais eficiente devido ao menor número de iterações requerido, tanto para o procedimento de incremento de carga, quanto para o procedimento de corte de carga.

A Tabela (5.1) mostra o processo de obtenção da margem mínima usando o método A. Uma maior precisão na obtenção da margem implica um maior número de iterações no processo total. Na maioria dos casos, três passos são requeridos exceto para a rede de 1081 barras, onde apenas são necessários dois passos iterativos. O parâmetro  $t$  e o procedimento de incremento de carga apenas são necessários na primeira direção de incremento de carga (Passo 1). Para os passos iterativos seguintes a MET e o PMC são obtidos usando somente o procedimento de corte de carga.

O parâmetro  $\gamma$  que normalmente é igual a 1 (sem modificar a expressão (5.2)), é usado para melhorar a eficiência do método, resultando em um menor número de iterações no procedimento de corte de carga. Em alguns casos,  $\gamma$  pode contribuir a evitar situações de divergência. É importante destacar que  $\gamma$  está dentro de uma pequena faixa de variação. São apresentados os valores da MET, o PMC ( $\lambda_*$ ), o parâmetro  $t$ , o número de iterações para o procedimento de incremento de carga, o número de iterações para o procedimento de corte de carga e o número de iterações total.

O maior esforço computacional ocorre para o passo 1, onde para alguns casos é necessário um considerável número de iterações no procedimento de incremento de carga. No entanto, a margem é calculada eficientemente.

A Tabela (5.2) mostra os resultados do processo de obtenção da METm, usando fator de potência constante para a direção inicial de incremento de carga. O número de iterações é excessivamente elevado, porém, o resultado da margem mínima é o mesmo. O aumento do número de iterações é devido ao valor da margem na primeira direção de incremento de carga, isto faz que o valor do PMC  $\lambda_*$  no segundo passo iterativo seja grande.

Pela experiência com as redes de grande e pequeno porte testadas, pode-se definir um limite superior para o valor do PMC. Com a finalidade de ilustração, é possível ver uma redução no número total de iterações na Tabela (5.3).

Tabela 5.1: Cálculo da margem mínima -  $\alpha, \beta = \omega$ 

Sistema	Item	Passo 1	Passo 2	Passo 3	Total it.
2 barras $\gamma=1,0$	$t$	0,05	—	—	14
	it. incremento de carga	5	—	—	
	it. corte de carga	3	4	2	
	$\lambda^*$	1,8577	1,9354	1,9579	
	MET	0,6304	0,6123	<b>0,6112*</b>	
14 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,015	—	—	16
	it. incremento de carga	7	—	—	
	it. corte de carga	3	3	3	
	$\lambda^*$	5,8927	9,907	11,1013	
	MET	0,4123	0,3579	<b>0,3563*</b>	
30 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,01	—	—	20
	it. incremento de carga	3	—	—	
	it. corte de carga	4	11	2	
	$\lambda^*$	4,3088	7,4340	8,008	
	MET	0,1731	0,1507	<b>0,1506*</b>	
57 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,003	—	—	16
	it. incremento de carga	5	—	—	
	it. corte de carga	2	7	2	
	$\lambda^*$	4,1137	4,9486	5,1616	
	MET	0,1118	0,0850	<b>0,0842*</b>	
300 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,02	—	—	25
	it. incremento de carga	3	—	—	
	it. corte de carga	2	10	10	
	$\lambda^*$	4,9605	7,4070	7,0509	
	MET	0,0792	0,04727	<b>0,0381*</b>	
1081 barras $\gamma=1,0$	$t$	0,0001	—	—	11
	it. incremento de carga	7	—	—	
	it. corte de carga	2	2	—	
	$\lambda^*$	8,4001	2,2051	—	
	MET	0,1901	<b>0,1857*</b>	—	

\* Corresponde à margem mínima METm.

Tabela 5.2: Cálculo da margem mínima -  $[\alpha=\beta]$  Vetor unitário

Sistema	Item	Passo 1	Passo 2	Passo 3	Passo 4	Total it.
2 barras $\gamma=1,0$	$t$	0,05	—	—	—	22
	it. incremento de carga	7	—	—	—	
	it. corte de carga	2	9	2	2	
	$\lambda^*$	2,5412	1,9034	1,9562	1,9602	
	MET	0,7383	0,6185	0,6116	<b>0,6112*</b>	
14 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,03	—	—	—	31
	it. incremento de carga	5	—	—	—	
	it. corte de carga	2	22	2	—	
	$\lambda^*$	4,0783	9,9510	11,1640	—	
	MET	0,8946	0,3598	<b>0,3551*</b>	—	
30 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,01	—	—	—	53
	it. incremento de carga	6	—	—	—	
	it. corte de carga	2	43	2	—	
	$\lambda^*$	2,9144	7,5726	8,1152	—	
	MET	0,4139	0,1526	<b>0,1521*</b>	—	
57 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,01	—	—	—	82
	it. incremento de carga	6	—	—	—	
	it. corte de carga	4	62	10	—	
	$\lambda^*$	5,8808	4,7850	5,1464	—	
	MET	1,9448	0,0858	<b>0,0841*</b>	—	
300 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,01	—	—	—	53
	it. incremento de carga	10	—	—	—	
	it. corte de carga	2	20	6	15	
	$\lambda^*$	1,4650	5,5761	7,4340	6,8449	
	MET	3,004	0,0665	0,0407	<b>0,0374*</b>	
1081 barras $\gamma=1,0$	$t$	0,0005	—	—	—	25
	it. incremento de carga	15	—	—	—	
	it. corte de carga	2	4	2	2	
	$\lambda^*$	0,2533	2,1041	2,0369	1,9866	
	MET	0,2197	0,2025	0,1934	<b>0,1888*</b>	

\* Corresponde à margem mínima METm.



Tabela 5.3: Cálculo da MET -  $[\alpha=\beta]$  Vetor unitário, limitando  $\lambda^*$ 

Sistema	Item	Passo 1	Passo 2	Passo 3	Passo 4	Total it.
2 barras $\gamma=1,0$	$t$	0,05	—	—	—	22
	it. incremento de carga	7	—	—	—	
	it. corte de carga	2	9	2	2	
	$\lambda^*$	2,5412	1,9034	1,9562	1,9602	
	MET	0,7383	0,6185	0,6116	<b>0,6112*</b>	
14 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,03	—	—	—	23
	it. incremento de carga	5	—	—	—	
	it. corte de carga	2	14	2	—	
	$\lambda^*$	4,0783	9,9420	11,152	—	
	MET	0,8946	0,3596	<b>0,3549*</b>	—	
30 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,01	—	—	—	37
	it. incremento de carga	6	—	—	—	
	it. corte de carga	2	27	2	—	
	$\lambda^*$	2,9144	7,5705	8,1136	—	
	MET	0,4139	0,1525	<b>0,1520*</b>	—	
57 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,01	—	—	—	62
	it. incremento de carga	6	—	—	—	
	it. corte de carga	4	46	6	—	
	$\lambda^*$	5,8808	4,7906	5,1160	—	
	MET	1,9448	0,0852	<b>0,0840*</b>	—	
300 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,01	—	—	—	47
	it. incremento de carga	10	—	—	—	
	it. corte de carga	2	2	19	14	
	$\lambda^*$	1,4650	5,4513	7,4060	6,9794	
	MET	3,004	0,0648	0,0408	<b>0,0382*</b>	
1081 barras $\gamma=1,0$	$t$	0,0005	—	—	—	25
	it. incremento de carga	15	—	—	—	
	it. corte de carga	2	4	2	2	
	$\lambda^*$	0,2533	2,1041	2,0369	1,9866	
	MET	0,2197	0,2025	0,1934	<b>0,1888*</b>	

\* Corresponde à margem mínima METm.

### 5.3 Método B - descrição geral

Esta seção apresenta uma modificação em relação ao método A resultando em um menor número de iterações no procedimento de corte de carga. Como consequência, este método é o mais eficiente devido ao menor número de iterações totais necessário na maioria dos casos. A idéia geral é descrita a seguir, com base na Figura 5.2. Define-se uma direção inicial de incremento de carga a partir do ponto de operação atual da rede (caso base). Aplicando os procedimentos de incremento de carga e corte de carga calcula-se o ponto de máximo carregamento PMC ( $\lambda_1$ ) e a margem correspondente MET1. Um novo ponto de operação  $\lambda_2$  é calculado com a expressão (5.2). Como este ponto de operação é infactível o método de fluxo de carga convencional não atingiria convergência. Usando o FCOP  $\mu$  tende a zero. As variáveis estáticas ( $V$ ,  $\theta$ ) determinadas pelo FCOP correspondem a um ponto na fronteira de factibilidade ( $\lambda'_2$ ). Os erros finais das potências

forneem informação da distância desde o ponto de operação  $\lambda_2$  até a fronteira de factibilidade. Devido a que  $\lambda'_2$  está na fronteira de factibilidade não é necessário aplicar o procedimento de corte de carga para obter o ponto de operação  $\lambda_3$ , o autovetor esquerdo  $\omega_2$  é obtido no ponto de operação  $\lambda_2$ . O processo é realizado até que dois autovetores consecutivos sejam paralelos. Neste caso os autovetores  $\omega_2$  e  $\omega_3$  são paralelos. O procedimento de corte de carga é aplicado apenas no último passo iterativo para levar o ponto de operação desde  $\lambda_3$  até  $\lambda^*$ .

A MET é obtida pela equação (5.1) e corresponde à distância desde o ponto de operação  $\lambda^*$  até o caso base  $\lambda_0$  medida em pu, porcentagem, MVA, MW ou MVar. Esta metodologia é a mais eficiente como será mostrado na seção de resultados, requerendo um menor número de iterações no procedimento de corte de carga e como consequência menor esforço computacional.

O procedimento é descrito a seguir.

- (1) Obter o ponto de operação inicial do sistema (caso base ).
- (2) Definir uma direção inicial de incremento de carga.
- (3) Estimar o PMC e a MET que corresponde à direção inicial de incremento de carga.
- (4) Calcular o autovetor esquerdo que corresponde ao PMC.
- (5) Determinar novos valores para  $\alpha_i$  e  $\beta_i$  a partir de (4.17).
- (6) Estimar um novo ponto de operação. Neste caso, é um ponto de operação na região infactível.
- (7) Calcular o autovetor esquerdo correspondente ao ponto de operação infactível calculado previamente.
- (8) Avaliar os dois últimos autovetores, se eles não são paralelos retornar para o passo (4).
- (9) No caso em que os autovetores sejam paralelos, aplicar o procedimento de corte de carga com o objetivo de retornar o ponto de operação para a fronteira de factibilidade. A distância desde este ponto de operação, até o caso base  $\lambda_0$ , corresponde à margem mínima.

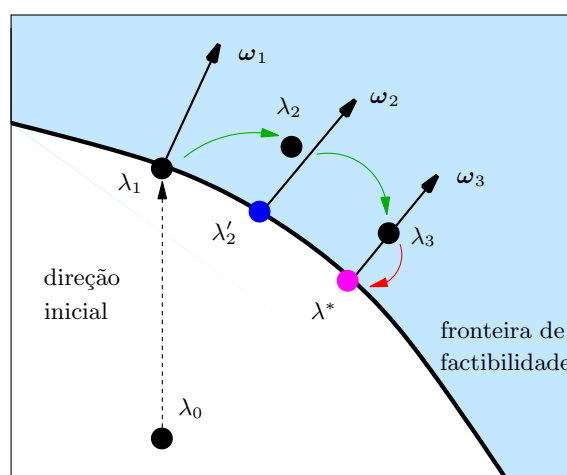


Figura 5.2: Obtenção da margem mínima - método B

## 5.4 Resultados

### 5.4.1 Obtenção da METm com $\alpha, \beta = \omega$

A Tabela (5.4) mostra os resultados da obtenção da margem mínima METm usando o método B. A partir da direção inicial de incremento de carga, o ponto de operação mantém-se sempre in-factível até a direção final de incremento de carga, onde os dois últimos autovetores correspondentes são paralelos. A direção inicial de incremento de carga baseia-se na informação do autovetor esquerdo avaliado para o menor autovalor da matriz Jacobiana no caso base. Neste caso o procedimento de incremento de carga e corte de carga são aplicados na primeira direção de incremento de carga como usualmente é feito nos outros métodos, mas, apenas no último passo iterativo é aplicado o procedimento de corte de carga, o que resulta em um menor número de iterações e menor esforço computacional. Deste modo, a METm é calculada de forma mais eficiente.

A Tabela (5.5) ilustra alguns valores da MET para fator de potência constante e alguns valores da METm em MVA, porcentagem, MW e MVar respectivamente. É muito importante ressaltar a diferença entre os dois casos. No caso de fator de potência constante, o carregamento pode ser incrementado na mesma quantidade tanto para potência ativa quanto para potência reativa, como é esperado. Já para a METm, a quantidade de potência ativa que pode ser incrementada é menor do que a quantidade de potência reativa. Portanto, esta é outra importante característica da obtenção da METm, pois o carregamento de um sistema de potência é predominantemente ativo (MW).

A Figura 5.3 mostra o processo de obtenção da MET e a evolução até obter a METm para os sistemas de 14 e 300 barras, respectivamente. É apresentado o valor da MET para a direção de incremento de carga com fator de potência constante e para cada passo iterativo segundo o procedimento da Tabela (5.4). Deste modo, nesta figura mostra-se a importância do cálculo da METm, onde menores distúrbios, tais como incrementos de carga em uma direção de incremento de carga imprevista (passos iterativos 1, 2 e 3) poderiam resultar em menores valores de MET ameaçando a operação do sistema em modo seguro.

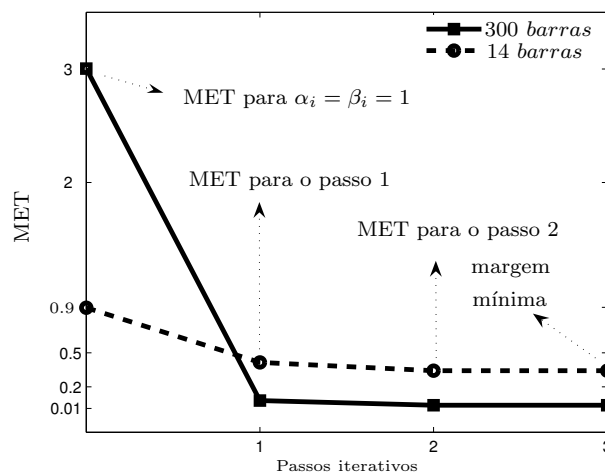


Figura 5.3: Obtenção da margem mínima para os sistemas de 14 e 300 barras

Tabela 5.4: Obtenção da margem mínima METm- método B

Sistema	Item	Passo 1	Passo 2	Passo 3	Total it.
2 barras $\gamma=1,0$	$t$	0,05	—	—	11
	it. incremento de carga	5	—	—	
	it. corte de carga	3	—	3	
	PMC	1,8577	1,9920	1,9583	
	MET	0,6304	0,6304	<b>0,6112*</b>	
14 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,015	—	—	13
	it. incremento de carga	7	—	—	
	it. corte de carga	3	—	3	
	PMC	5,8927	9,9820	11,074	
	MET	0,4123	0,3674	<b>0,3524*</b>	
30 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,01	—	—	16
	it. incremento de carga	3	—	—	
	it. corte de carga	4	—	9	
	PMC	4,3088	7,5608	8,0895	
	MET	0,1731	0,15382	<b>0,1519*</b>	
57 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,003	—	—	14
	it. incremento de carga	5	—	—	
	it. corte de carga	2	—	7	
	PMC	4,1137	5,7055	5,1251	
	MET	0,1118	0,0989	<b>0,0843*</b>	
300 barras $\gamma=0,9$	$t$	0,02	—	—	17
	it. incremento de carga	3	—	—	
	it. corte de carga	2	—	12	
	PMC	4,9605	9,489	7,7691	
	MET	0,0792	0,0537	<b>0,0379*</b>	
1081 barras $\gamma=1.0$	$t$	0,0001	—	—	11
	it. incremento de carga	7	—	—	
	it. corte de carga	2	2	—	
	PMC	8,4001	2,2051	—	
	MET	0,1901	<b>0,1857*</b>	—	

\* Corresponde à METm

#### 5.4.2 Comparação entre métodos para obter o PMC e a MET

O método da continuação [7] pode ser usado para obter a MET. Porém, apresenta alguns problemas de convergência, conforme mostra a Tabela (5.6).

O método proposto no Capítulo 3, usando técnicas de programação não-linear permite calcular a MET eficientemente e com precisão. O método da continuação diverge para grandes valores do parâmetro heurístico  $t$  ( $t = 0.1$ ). Além disso, o método da continuação demanda um número elevado de iterações para calcular a MET com uma precisão similar à obtida usando técnicas de programação não-linear.

Tabela 5.5: Valores da margem mínima METm e MET para fator de potência constante

Sistema	MET for $\alpha = \beta = 1$			METm		
	[MVA]	(%)	(P,Q)	[MVA]	(%)	(P,Q)
2 barras	73,83	P 126% Q 126%	63MW 37Mvar	61,12	P 41,8% Q 191%	20,9MW 57,4Mvar
14 barras	89,46	P 77% Q 77%	88,18MW 15,28Mvar	35,24	P 24,52% Q 178%	21,53MW 28,03Mvar
30 barras	41,39	P 38% Q 38%	40,66MW 7,74Mvar	15,19	P 15,85% Q 71,06%	10,43MW 11,04Mvar
57 barras	194,48	P 56% Q 56%	193,9MW 16,45Mvar	8,43	P 1,3% Q 1,46%	4,67MW 6,97Mvar
300 barras	300,40	P 5,9% Q 5,9%	294,45MW 60,21Mvar	3,79	P 0,01% Q 0,21%	1,90MW 3,26Mvar
1081 barras	21,97	P 0,4% Q 0,4%	18,74MW 11,33Mvar	18,57	P 0,2% Q 1,07%	12,28MW 13,80Mvar

Tabela 5.6: Comparação dos métodos para obter o PMC para uma rede de 2 barras

$t$	Método do Capítulo 3		Método da Continuação			
	0,05	0,1	0,1	0,06	0,04	0,01
MET	0,7383	0,7386	diverge	0,6837	0,6910	0,7338
MLP	1,2753	1,2717		1,1734	1,1862	1,2699
Iterações	9	8		6	9	40

### 5.4.3 Comparação entre métodos para obter METm

A seguir serão comparados os métodos propostos na Seção 4.4 e na Seção 5.3, para avaliar seus desempenhos. O método B da Seção 5.3 requer um menor número de iterações. Outra vantagem do método B é que o vetor tangente e a expressão (3.10) apenas são calculadas na primeira direção de incremento de carga, enquanto que, no caso dos métodos do Capítulo 4 a expressão de incremento de carga (3.10) e o vetor tangente devem ser calculados em cada direção de incremento de carga. O ponto de operação inicial em cada uma das direções corresponde ao caso base. Isto não é necessário em cada uma das novas metodologias propostas no Capítulo 5.

Tabela 5.7: Comparação entre métodos

Sistema	Método da Seção 4.4		Método da Seção 5.3	
	METm	Iterações	METm	Iterações
2 barras	0,6112	18	0,6112	11
IEEE 14 barras	0,3410	23	0,3524	13
IEEE 30 barras	0,1504	17	0,1519	16
IEEE 57 barras	0,0848	17	0,0843	14
IEEE 300 barras	0,0376	28	0,0379	17
1081 barras	0,1864	20	0,1857	11

## Capítulo 6

# Determinação das áreas críticas com relação à estabilidade de tensão

### 6.1 Fatores de participação: aspectos gerais

Com o aumento do carregamento em um sistema de potência, este pode operar em estado de emergência. Assim, os operadores do sistema devem tomar medidas de controle tais como redespacho das unidades geradoras, compensação reativa ou corte de carga com o objetivo de retornar o ponto de operação do sistema ao modo seguro.

As áreas críticas estão relacionadas com as áreas ou barras mais fracas do sistema, quer dizer, as que mais contribuem à perda de estabilidade de tensão. A identificação de áreas críticas permite ao operador escolher a melhor ação de controle para evitar o estado de operação em estado de emergência.

Alguns distúrbios, especialmente nas áreas mais críticas podem resultar no estado de operação inseguro do sistema ou nos piores casos no colapso de tensão ou a perda de estabilidade em determinada região. A técnica dos fatores de participação é uma ferramenta muito útil na operação do sistema, pois pode identificar as piores barras ou áreas que contribuem para a perda de estabilidade [24–26].

Os fatores de participação (FP) indicam a área crítica de um sistema de potência associada com um modo. Os maiores elementos do vetor que contém os fatores de participação indicam os locais onde ações remediais a serem aplicadas em determinada barra são mais efetivas para estabilizar aqueles modos. Podem também ser associados dois casos principais aos modos em relação aos fatores de operação, o modo localizado e o modo não localizado. O modo localizado ocorre quando o espectro dos fatores de participação contém algumas poucas barras com grandes valores de FP e as barras restantes têm valores comparativamente muito menores. O modo não localizado corresponde a um espectro onde aparecem várias barras com FP maiores e as barras restantes com valores menores. O modo não localizado, por exemplo, corresponde a um sistema de grande porte onde não é possível fornecer ou transportar mais potência reativa. Por outro lado, o modo localizado corresponde, por exemplo, ao caso de uma barra ou área conectada ao restante de um sistema de potência através de uma grande distância elétrica. Do ponto de vista prático, não se pode calcular todos os autovalores da matriz Jacobiana para um sistema de grande porte. Uma abordagem usada na literatura é calcular o autovalor mínimo em cada caso correspondente ao modo crítico. Entretanto, pode aparecer mais de um modo crítico conforme o sistema é carregado. Uma

recomendação é calcular entre 5 e 8 autovalores em cada caso até encontrar o ponto de máximo carregamento. Isto pode aumentar o esforço computacional do ponto de vista do monitoramento em tempo real de grandes redes. Por outro lado, não é conveniente usar a magnitude dos autovalores como uma medida do ponto de colapso de tensão devido à não linearidade do problema [1].

As equações de fluxo de carga podem ser escritas como

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}. \quad (6.1)$$

De acordo com a expressão (2.2), a matriz Jacobiana pode ser escrita como  $J = \nu \cdot \Lambda \cdot \omega$ , onde  $\nu$  corresponde ao autovetor direito de  $J$ ,  $\Lambda$  corresponde aos autovalores de  $J$ , e  $\omega$  corresponde ao autovetor esquerdo de  $J$ . Os fatores de participação podem ser escritos como

$$FP = \nu \cdot \omega. \quad (6.2)$$

Os fatores de participação podem ser obtidos para as contribuições ativas e reativas do sistema. As contribuições ativas fornecem informação sobre a geração e sobre a carga em relação a potência ativa. Esta informação é importante já que é possível aliviar a margem melhorando a distribuição da geração (redespacho) ou fazendo corte de carga em algumas barras críticas. A contribuição ativa de uma barra  $k$  pode ser escrita como:

$$FPA_k = \nu_k^A \cdot \omega_k^A, \quad (6.3)$$

em que  $\nu_k^A$  e  $\omega_k^A$  são os elementos de  $\nu$  e  $\omega$  correspondentes à parte ativa da barra  $k$ . As contribuições reativas fornecem informação sobre as barras que estão contribuindo para a diminuição da margem em relação a potência reativa. Portanto, compensação reativa nestas barras ajudaria a aliviar a margem. Estas são dadas por:

$$FPR_k = \nu_k^R \cdot \omega_k^R, \quad (6.4)$$

em que  $\nu_k^R$  e  $\omega_k^R$  são os elementos de  $\nu$  e  $\omega$  correspondentes à parte reativa da barra  $k$ .

## 6.2 Resultados

### 6.2.1 Fatores de participação e áreas congestionadas

A avaliação do impacto ativo e reativo de cada barra na segurança do sistema é indispensável para a escolha da melhor ação de controle para aliviar problemas de congestionamento, tais como a identificação de áreas cruciais onde o corte de carga é aceitável sob certas condições e incentivos e as melhores áreas para o investimento de fontes de potência reativa.

Em alguns casos testados o maior impacto na METm está relacionado com  $FPR$ . Isto significa que a deficiência de reativos contribui principalmente para a redução da METm. Portanto, compensação reativa é mais importante do que corte de carga para aliviar a margem.



As Figuras 6.1 e 6.2 mostram os fatores de participação para a rede de 14 barras. As barras 12, 13 e 14 são as barras que mais contribuem para a redução da margem, tanto  $FPA$  quanto  $FPR$ .

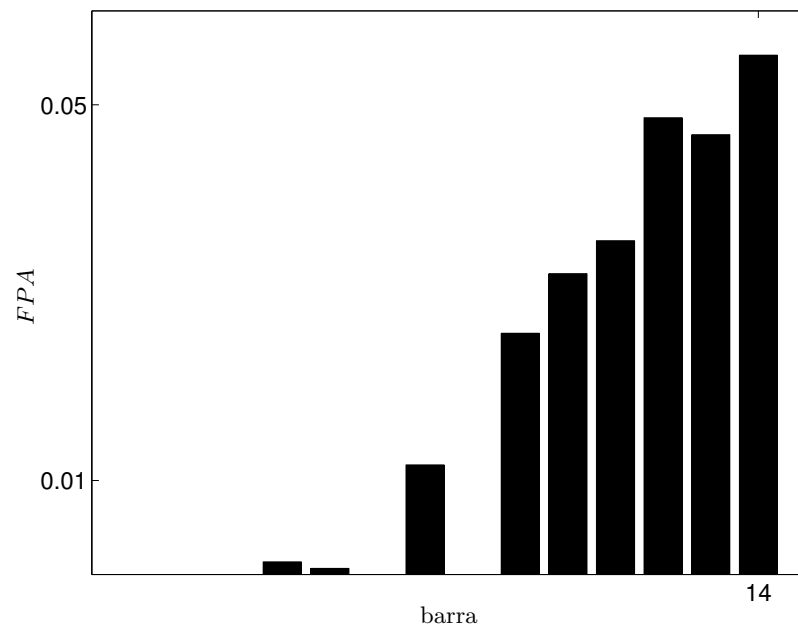


Figura 6.1: Sistema IEEE 14 barras:  $FPA$

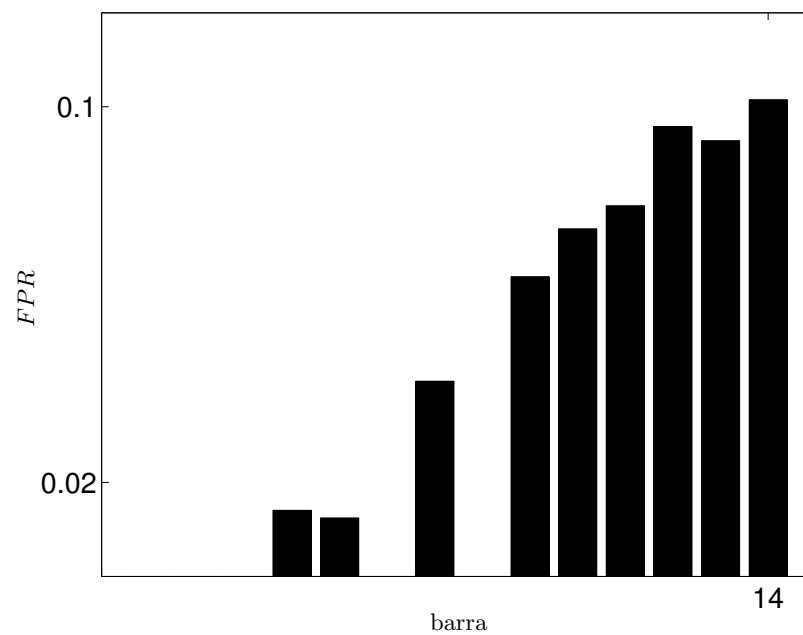


Figura 6.2: Sistema IEEE 14 barras:  $FPR$

As Figuras 6.3 e 6.4 mostram os  $FPA$  e  $FPR$  para a rede de 30 barras. As barras mais críticas são 26, 29 e 30.

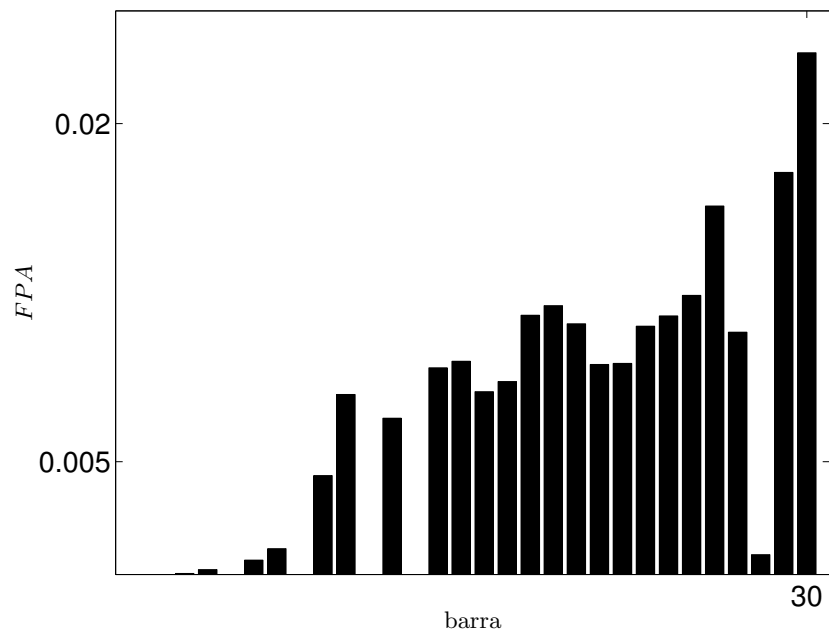


Figura 6.3: Sistema IEEE 30 barras:  $FPA$

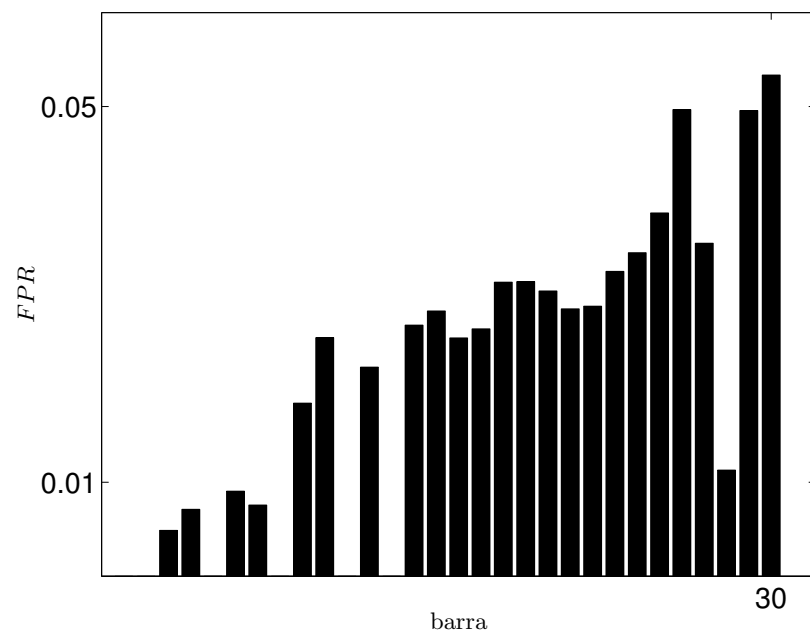


Figura 6.4: Sistema IEEE 30 barras:  $FPR$

As Figuras 6.5 e 6.6 mostram os  $FPA$  e  $FPR$  para a rede de 57 barras. As barras críticas são 31, 32 e 33.

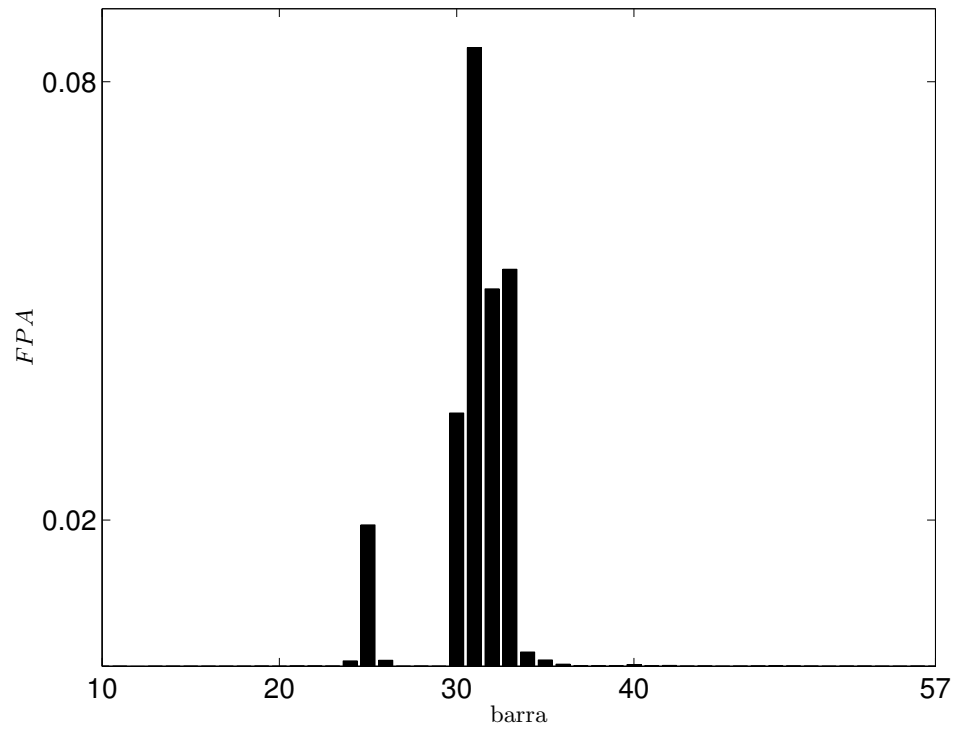


Figura 6.5: Sistema IEEE 57 barras:  $FPA$

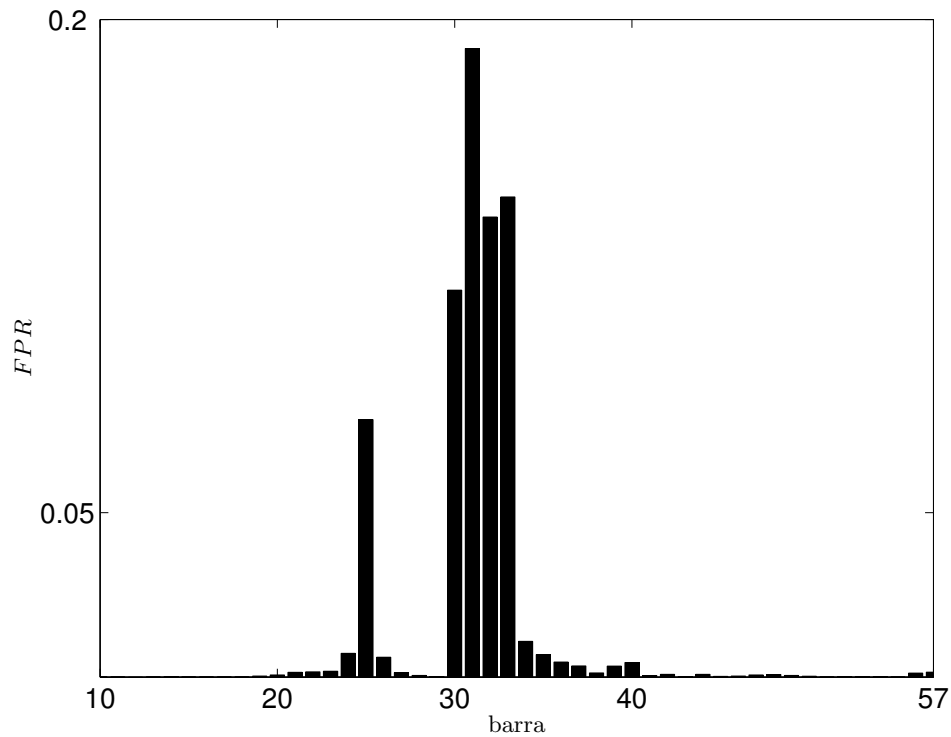


Figura 6.6: Sistema IEEE 57 barras:  $FPR$

As Figuras 6.7 e 6.8 mostram a área mais crítica para o sistema IEEE 14 barras e IEEE 30 barras, respectivamente. Neste caso não é difícil identificar as barras que contribuem para a diminuição da margem, que correspondem às barras mais afastadas das unidades de geração e das fontes de potência reativa. Entretanto, em outros casos é mais difícil identificar estas barras. Podem aparecer muitas áreas críticas em diferentes regiões do sistema como acontece para o sistema de 1081 barras. A Tabela (6.1), mostra que aparecem duas áreas críticas em diferentes regiões. Também são mostradas na Tabela (6.1) as barras críticas correspondentes à METm para outros sistemas de potência.



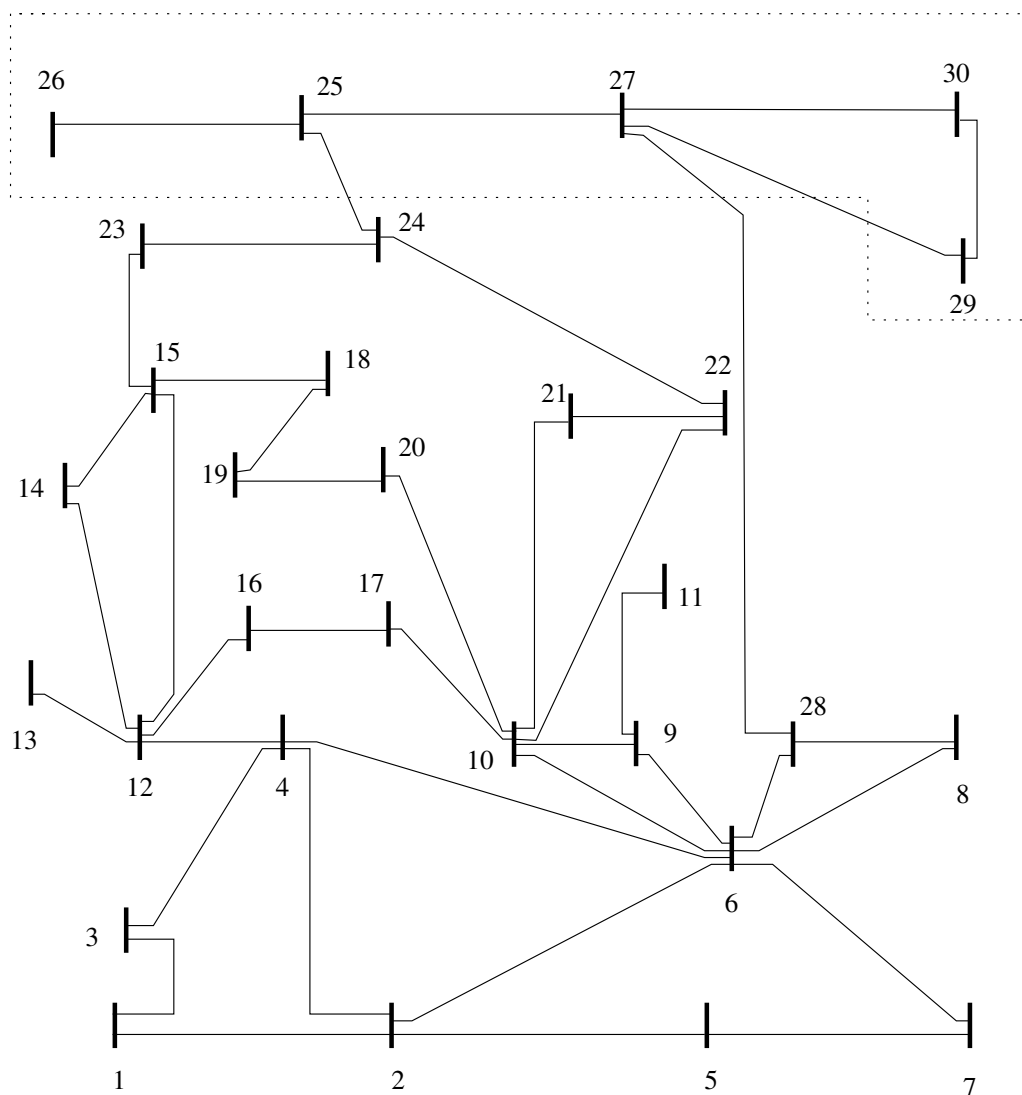


Figura 6.8: Sistema IEEE 30 barras, área e barras críticas

resultados do cálculo da margem mínima usando uma das metodologias propostas no Capítulo 4 e a metodologia B proposta no Capítulo 5. É possível ver uma diferença no número de iterações totais, e os resultados das margens mínimas são muito próximos.

Esta análise não representa um estudo rigoroso de contingências. O objetivo é ilustrar o desempenho dos métodos propostos e demonstrar que distúrbios nas regiões críticas levam a um impacto altamente negativo na margem e nos piores cenários pode-se apresentar o colapso de tensão. Tal situação ocorreu para as redes de 300 e 1081 barras para algumas contingências na região mais crítica. Entretanto, estudos mais completos devem ser feitos para avaliar os verdadeiros impactos nas redes maiores e reais. A Tabela (6.3) mostra que a metodologia proposta na Seção 5.3 requer um menor número de iterações para encontrar a margem mínima ainda em situações de contingências.

Como mostrado na Tabela (6.2), os métodos propostos podem ser aplicados para calcular margens para situações pós-contingência. As linhas foram escolhidas tendo em conta aquelas que afetam principalmente as áreas críticas.

Tabela 6.2: Resultados para situações de contingências usando o método da Seção 4.4

Sistema	Item	Passo 1	Passo 2	Passo 3	Total Iterações
14 barras $t = 0,015$ linha 13-14 fora de operação	it. incremento de carga it. corte de carga PMC MET	7 2 5,9163 0,4176	5 2 9,2174 0,3271	4 2 8,9699 <b>0,3234*</b>	22
14 barras $t = 0,005$ linha 9-14 fora de operação	it. incremento de carga it. corte de carga PMC MET	9 2 3,3992 0,2359	4 2 5,0673 0,1879	3 2 5,0948 <b>0,1846*</b>	22
30 barras $t = 0,005$ linha 29-30 fora de operação	it. incremento de carga it. corte de carga PMC MET	9 2 4,2910 0,1740	4 2 7,2828 0,1491	3 2 7,7411 <b>0,1479*</b>	22
30 barras $t = 0,0005$ linha 27-28 fora de operação	it. incremento de carga it. corte de carga PMC MET	4 2 0,4224 0,013	2 2 0,4184 <b>0,0091*</b>		10

\* corresponde à METm.

Tabela 6.3: Resultados para situações de contingências usando o método da Seção 5.3

Sistema	Item	Passo 1	Passo 2	Passo 3	Total Iterações
14 barras $t = 0,015$ linha 13-14 fora de operação	it.incremento de carga it. corte de carga PMC MET	7 2 5,9163 0,4176	– – 8,6271 0,3265	– 2 9,1270 <b>0,3264*</b>	11
14 barras $t = 0,005$ linha 9-14 fora de operação	it. incremento de carga it. corte de carga PMC MET	9 2 3,3992 0,23594	– – 4,8458 0,1812	– 2 4,9362 <b>0,1812*</b>	13
30 barras $t = 0,005$ linha 29-30 fora de operação	it. incremento de carga it. corte de carga PMC MET	9 2 4,2910 0,1740	– – 7,5273 0,1545	– 7 7,9665 <b>0,1487*</b>	18
30 barras $t = 0,0005$ linha 27-28 fora de operação	it. incremento de carga it. corte de carga PMC MET	4 2 0,4224 0,0103	– 2 0,4719 <b>0,0097*</b>		8

\* corresponde à METm.

As Figuras 6.9 e 6.10 mostram o impacto das contingências que afetam diretamente as áreas críticas. Os maiores valores dos fatores de participação são os que principalmente estão contribuindo à redução da margem mínima. É importante enfatizar que estes valores correspondem na maioria

dos casos, às barras dentro ou próximas das regiões críticas.

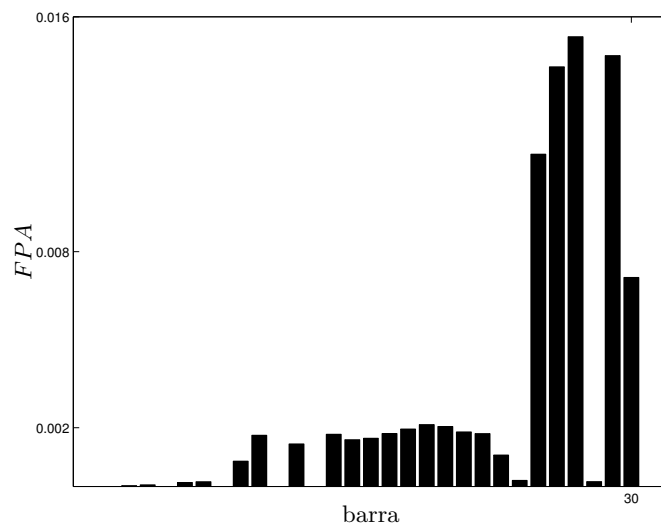


Figura 6.9: Sistema IEEE 30 barras,  $FPA$  no cenário pós-contingência na direção da METm

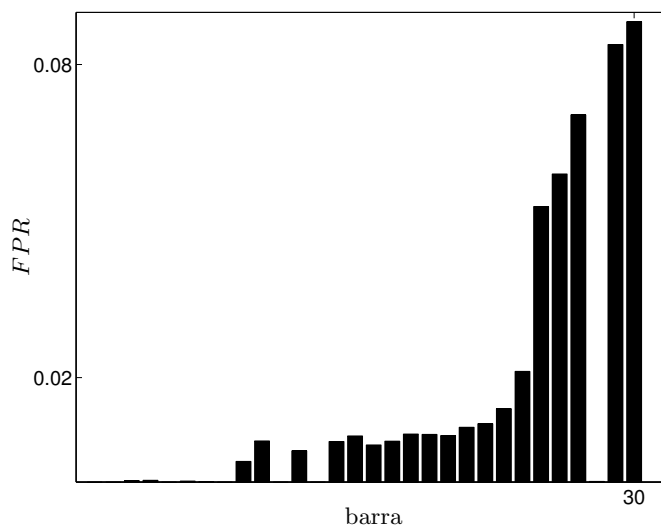


Figura 6.10: Sistema IEEE 30 barras,  $FPR$  no cenário pós-contingência na direção da METm



As Figuras 6.11 e 6.12 mostram diferentes valores da margem para as redes de 30 e 14 barras respectivamente. A margem é comparada com o valor da MET obtida para fator de potência constante, que é maior, enquanto para algumas contingências a margem é muito pequena. Assim, mostra-se que algumas contingências nas áreas críticas afetam a margem de forma notória.

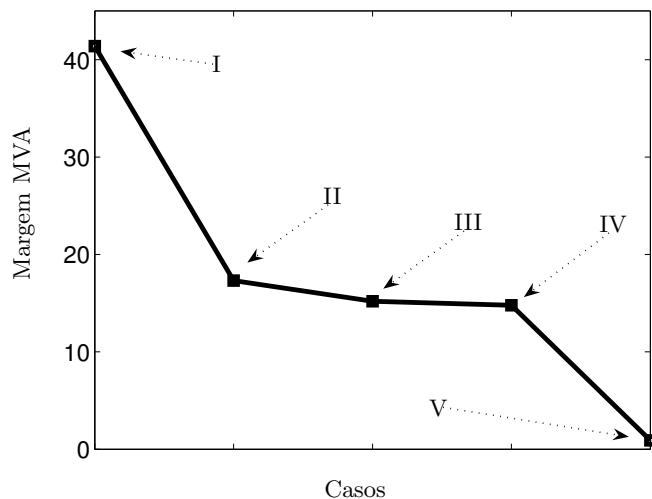


Figura 6.11: Sistema IEEE 30 barras: diferentes margens

Caso I = MET para fator de potência constante. Caso II = MET para fator de potência variável. Caso III = METm para condições normais de operação. Caso IV = METm para uma contingência na linha 29-30. Caso V = METm para uma contingência na linha 27-28.

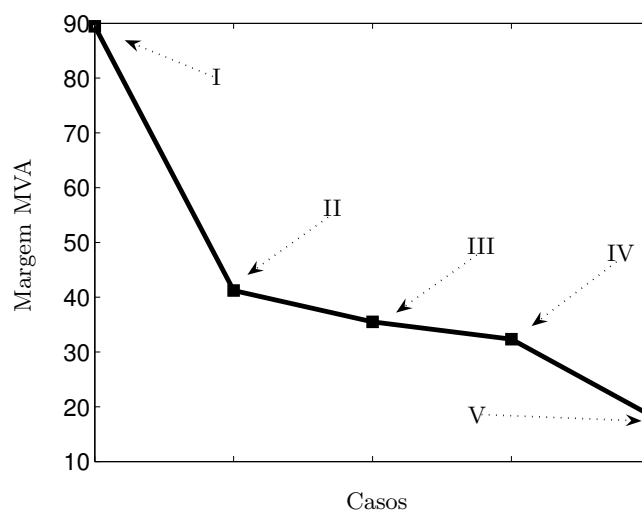


Figura 6.12: Sistema IEEE 14 barras: diferentes margens

Caso I = MET para fator de potência constante. Caso II = MET para fator de potência variável. Caso III = METm para condições normais de operação. Caso IV = METm para uma contingência na linha 13-14. Caso V = METm para uma contingência na linha 9-14.

## Capítulo 7

# Pesquisas adicionais

Neste capítulo são apresentadas algumas pesquisas adicionais aproveitando algumas propriedades da análise de sensibilidade. A sensibilidade mede a atividade das variáveis em determinado ponto de operação, a qual pode ser avaliada mediante a informação da diagonal da matriz Jacobiana do fluxo de carga. Isto quer dizer, avaliando as variações na diagonal principal  $diagP$  e  $diagQ$  obtém-se

$$diagP = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} \quad e \quad diagQ = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k}, \quad para \quad k = 1...n, \quad (7.1)$$

onde no caso de  $\partial P/\partial \theta$  corresponde às contribuições das barras PQ e PV, informações importantes dos melhores locais para aplicar medidas de controle como redespacho e corte de carga são obtidas. No caso de  $\partial Q/\partial V$  corresponde às contribuições das barras PQ, informações de locais com deficiência de reativos são adquiridas.

Devido à atividade medida pela sensibilidade, é possível escolher a direção de incremento de carga baseada na informação fornecida pela sensibilidade ao invés do autovetor esquerdo. Como será mostrado, esta direção resulta na direção crítica de incremento de carga e a margem encontrada corresponde à margem mínima.

Os resultados obtidos mostram que o comportamento da sensibilidade corresponde ao comportamento dos fatores de participação do ponto de vista do espectro. O espectro é mais importante do que o valor numérico das contribuições, pois o espectro indica os lugares onde medidas de controle preventivas ou corretivas são mais eficientes para manter um valor apropriado da margem. Os fatores de participação apresentam como desvantagem, além do custo computacional no cálculo dos autovetores e autovalores, o fato de que devem ser monitorados, pois demonstrou-se na literatura que o modo crítico pode mudar conforme o carregamento é incrementado na rede. Tanto as sensibilidades quanto os fatores de participação foram avaliados em diferentes pontos de operação: no caso base, no PMC para fator de potência constante, no PMC para uma direção de incremento de carga avaliando o autovetor esquerdo e nos PMC subsequentes até encontrar a margem mínima. Em alguns casos a avaliação dos fatores de participação fornece um espectro que não corresponde ao espectro avaliado nos diferentes PMC, isto acontece especialmente para redes com carga leve onde as contribuições correspondentes aos fatores de participação reativos não são muito grandes. Por outro lado, a avaliação de sensibilidade fornece um espectro mais apropriado e cálculos extras não são necessários (autovalores, autovetores). O espectro avaliado no caso base geralmente corresponde ao espectro avaliado nos diferentes PMC.

Também é avaliada a probabilidade da ocorrência do colapso de tensão nos diferentes pontos de operação antes mencionados.

## 7.1 Obtenção da margem mínima

A Figura 7.1 mostra o espaço de parâmetros de carga para qualquer sistema de potência. O ponto de operação  $\lambda_0$  corresponde ao caso base,  $\lambda_1$  corresponde ao PMC para incremento de carga com fator de potência constante,  $\lambda_2$  corresponde ao PMC para uma direção de incremento de carga baseada na informação do autovetor esquerdo da matriz Jacobiana,  $\lambda_3$  corresponde ao PMC para outra direção de incremento de carga (no método iterativo) avaliando um novo autovetor esquerdo no  $\lambda_2$  (preditor-corretor). Finalmente  $\lambda_*$  corresponde ao PMC na direção crítica (direção da margem mínima) respectivamente.

O ponto de operação  $\lambda_1$  corresponde ao PMC com fator de potência constante e pode ser obtido aplicando o método descrito no Capítulo 3. O ponto de operação  $\lambda_*$  corresponde ao PMC onde a margem mínima é obtida na pior direção de incremento de carga. Neste caso, não é necessário aplicar os procedimentos descritos nos capítulos anteriores (preditores-corretores) onde diferentes pontos na fronteira são avaliados até que a diferença entre autovetores seja menor que uma tolerância predefinida. Avaliando as sensibilidades da matriz Jacobiana no caso base ao invés do autovetor esquerdo é obtida uma direção de incremento de carga crítica sem necessidade de avaliar novas as direções de incremento de carga. A margem mínima obtida corresponde à margem avaliada nos métodos apresentados nos capítulos anteriores na direção de incremento de carga correspondente ao último passo iterativo. As sensibilidades correspondem à diagonal da inversa da matriz Jacobiana completa ( $J^{-1}$ ) avaliada no método do fluxo de carga. Alguns aspectos relevantes desta abordagem são descritos a seguir: não é necessário avaliar o autovetor esquerdo da matriz Jacobiana no caso base, diferentes direções de incremento de carga para fazer a correção da margem e da direção de incremento de carga não são necessárias, o número de iterações total do processo é menor do que o obtido nas outras metodologias antes propostas neste trabalho e na literatura, o monitoramento dos 5 menores autovalores para encontrar o modo crítico não é necessário já que esta metodologia não exige a avaliação de autovalores nem de autovetores. No caso do modo crítico no caso base não corresponder ao modo crítico no ponto de máximo carregamento, o procedimento não é afetado visto que as sensibilidades não dependem do modo, como acontece na abordagem de análise modal. Os resultados obtidos abrem uma nova perspectiva para o cálculo dos piores cenários de incremento de carga. A dificuldade da avaliação e monitoramento de autovalores e autovetores é superada com o uso de sensibilidades que facilmente podem ser obtidas com os valores da matriz Jacobiana (não reduzida) calculada no fluxo de carga. Finalmente, não é necessário esboçar a fronteira de factibilidade para obter o valor da margem mínima ou o pior cenário de incremento de carga.

Aplicando o método de fluxo de carga no caso base obtém-se

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H' & N' \\ M' & L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}, \quad (7.2)$$

tomando a informação da diagonal da matriz Jacobiana completa é possível obter as sensibilidades ativas e reativas,

$$S_{ativo} = H'_{kk}, \quad S_{reativo} = L'_{kk}. \quad (7.3)$$

A direção de incremento de carga usando a informação das sensibilidades pode ser obtida por

$$\alpha = \frac{H'_{kk}}{P_{sch}}, \quad \beta = \frac{L'_{kk}}{Q_{sch}}. \quad (7.4)$$

O procedimento de obtenção da METm é descrito a seguir.

- (1) Obter o ponto de operação inicial do sistema (caso base).
- (2) Escolher um método para encontrar PMC, tal como o método do Capítulo 3, continuação, otimização, etc.
- (3) Obter as sensibilidades da matriz Jacobiana do fluxo de carga avaliada no caso base ( $J^{-1}$ ).
- (4) Definir uma direção de incremento de carga usando (7.4).
- (5) Calcular o PMC.
- (6) Estimar a MET.
- (7) Se for necessário, voltar ao passo (4), se não terminar o processo e a MET calculada corresponde à METm.

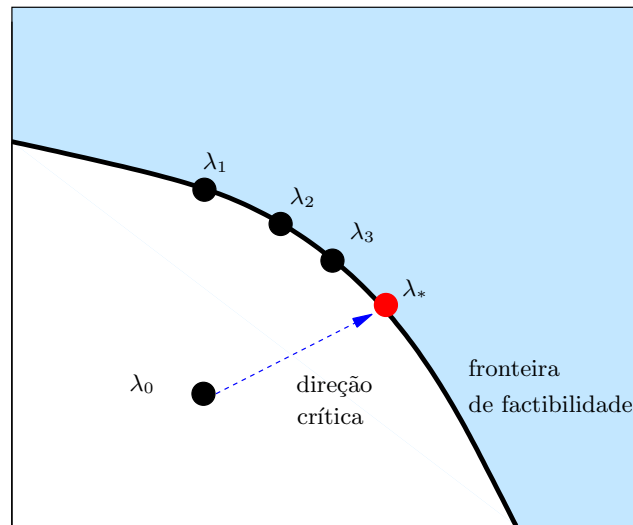


Figura 7.1: Margem mínima usando sensibilidades

## 7.2 Cálculo da margem mínima usando sensibilidades

A Tabela (7.1) mostra os resultados obtidos usando uma direção de incremento de carga avaliando a sensibilidade da matriz Jacobiana no caso base, como explicado anteriormente. São mostrados o número de iterações em cada etapa, o valor da MET, o PMC, o número total de iterações, e uma comparação com o método descrito na seção 5.3. Apesar de calcular a margem de uma maneira muito eficiente e com resultados muito próximos dos obtidos nos outros métodos

(erro muito pequeno), outros sistemas devem ser testados e analisados com mais detalhe tais como sistemas de grande porte e sistemas reais.

O cálculo da margem mínima usando sensibilidades para o sistema brasileiro de 1081 barras levou a uma METm diferente daquela obtida pelos outros métodos. Portanto, estudos adicionais devem ser realizados para esclarecer as razões que levaram às diferenças na METm calculada para a direção de incremento de carga baseada em (7.4).

Tabela 7.1: Cálculo da margem mínima - Usando sensibilidades

Sistema	Item	Passo 1	Passo 2	Total it	Método seção 5.3
14 barras	$t$	0,005			
	it. incremento de carga	8			
	it. corte de carga	2	2	12	Total it. METm=0,3524
	$\lambda^*$	9,720	11,289		13 Erro=0,01
	METm	0,3403	0,3400		
30 barras	$t$	0,003	Passo 2		
	it. incremento de carga	2			
	it. corte de carga	2	2	6	Total it. METm=0,1519
	$\lambda^*$	7,5191	8,770		16 Erro=0,007
	METm	0,1448	0,1448		
57 barras	$t$	0,001			
	it. incremento de carga	5			
	it. corte de carga	2	2	9	Total it. METm=0,084
	$\lambda^*$	6,4608	6,946		14 Erro=0,0006
	METm	0,096	0,0847		
300 barras	$t$	0,002			
	it. incremento de carga	7			
	it. corte de carga	2	2	11	Total it. METm=0,0379
	$\lambda^*$	11,834	9,263		17 Erro=0,003
	METm	0,046	0,041		
Sistema Peruano (460 barras)	$t$	0,002			
	it. incremento de carga	8			
	it. corte de carga	2	2	12	Total it. METm=0,0111
	$\lambda^*$	11,217	15,461		26 Erro=0,0003
	METm	0,0175	0,0115		

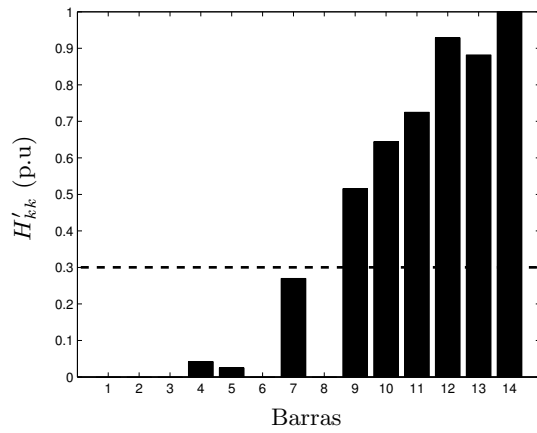
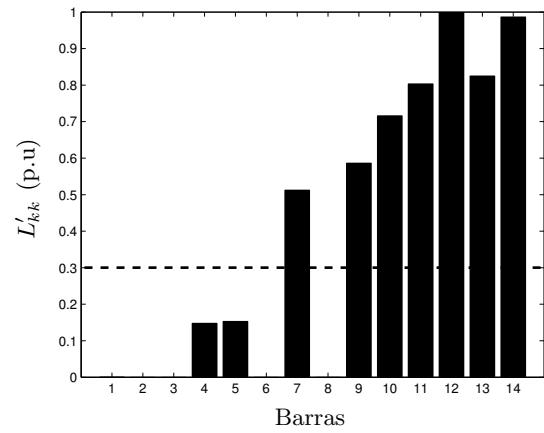
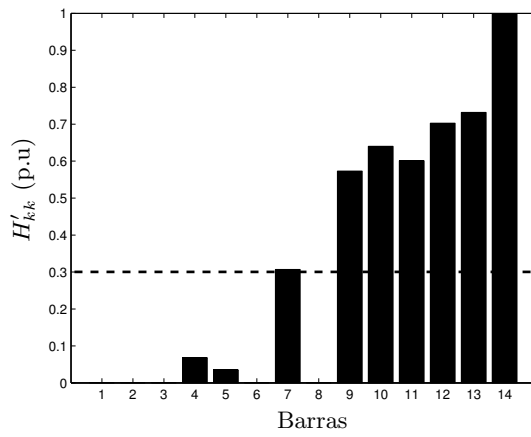
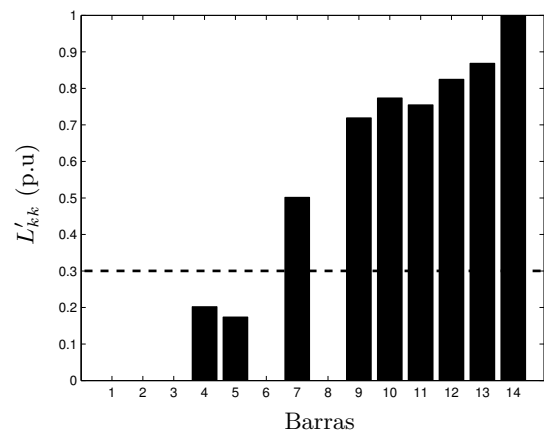
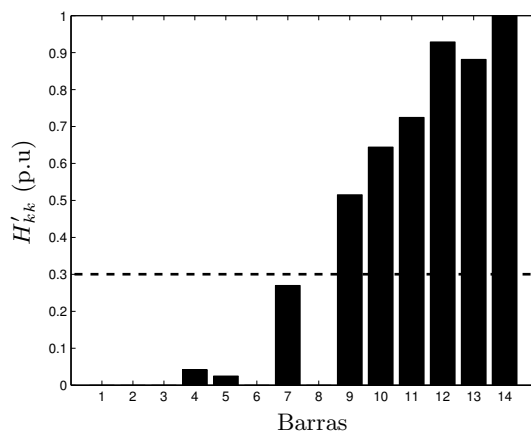
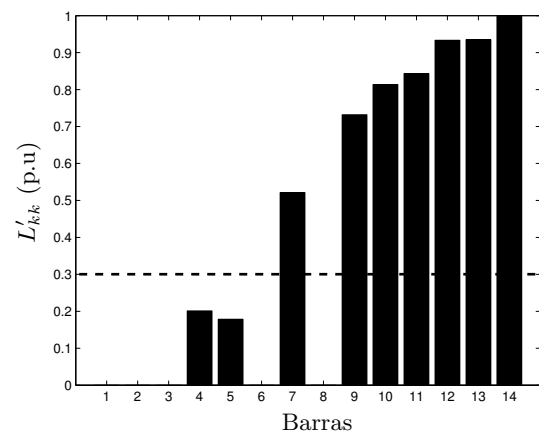
### 7.3 Análise de sensibilidades em diferentes pontos de operação

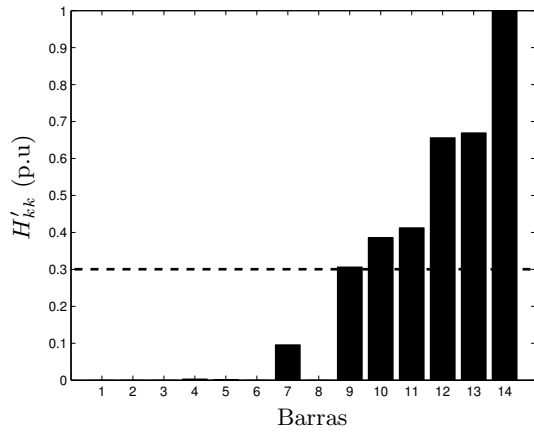
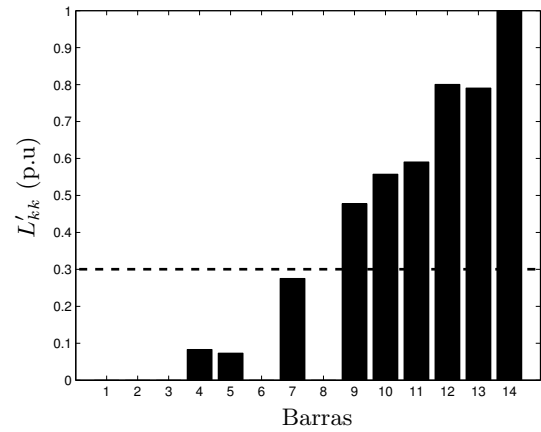
As Figuras 7.2 a 7.23 mostram o espectro das sensibilidades para diferentes redes em diferentes pontos de operação, os mesmos pontos de operação onde é calculada a probabilidade de ocorrência do colapso de tensão, Seção (7.4). É possível notar que, em geral, as barras com maiores contribuições no caso base (CB(1)) correspondem as piores barras nos outros pontos de operação (PMC(2-5)). No PMC correspondente à margem mínima, o número de barras afetadas é pequeno, por conseguinte o risco de que esta situação seja apresentada é pouco provável, comprovando os fatos encontrados na Seção (7.4).

A análise de sensibilidade fornece uma idéia das áreas críticas desde o ponto de operação atual da rede. Estas áreas correspondem às áreas avaliadas em diferentes PMC para diferentes direções de incremento de carga. Então, para obter as barras críticas que poderiam contribuir ao colapso no pior cenário de incremento de carga não é necessário encontrar a margem mínima e a pior direção de incremento de carga. O cálculo da margem mínima é importante no caso que se deseje obter o valor numérico da mesma, ou seja, a distância desde o ponto de máximo carregamento até o caso base.

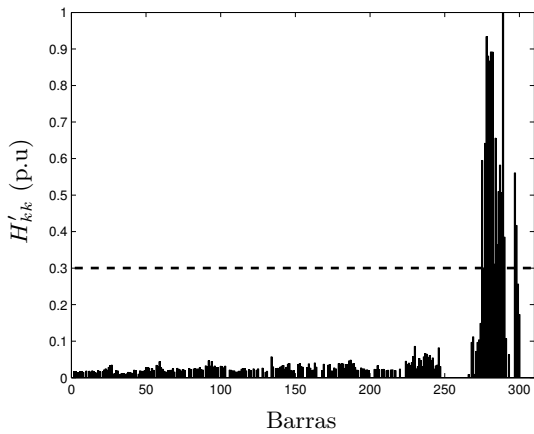
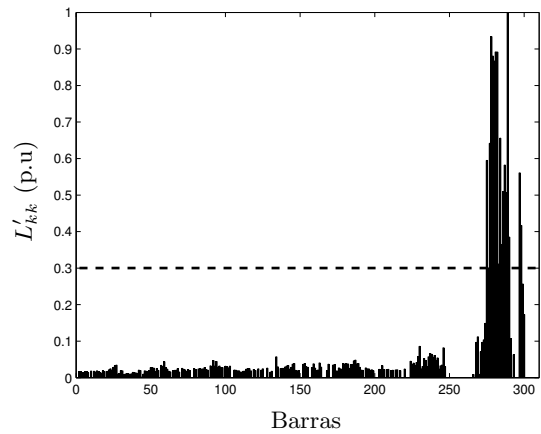
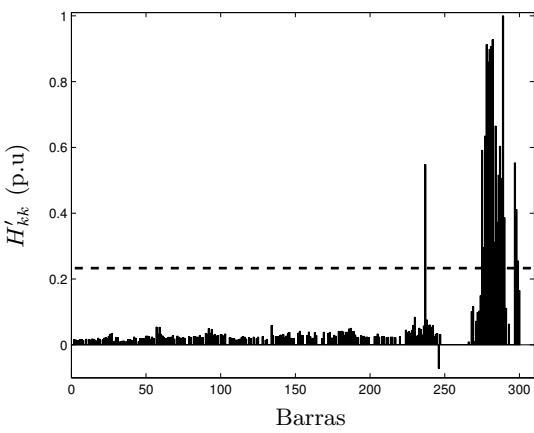
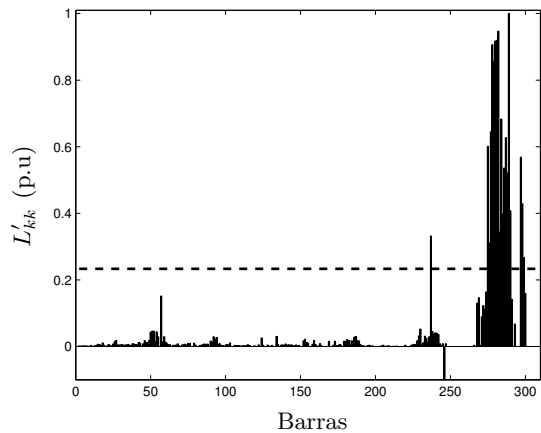
A análise de sensibilidade também provê uma representação da rede mais confiável que a técnica dos fatores de participação, pois os fatores de participação medem as contribuições (avaliadas pelos autovetores), e foi encontrado que em alguns casos os espectros dos fatores de participação no caso base não correspondem aos espectros em outros pontos de operação, especialmente em redes com carga leve.

## Sensibilidades para a Rede IEEE 14 Barras

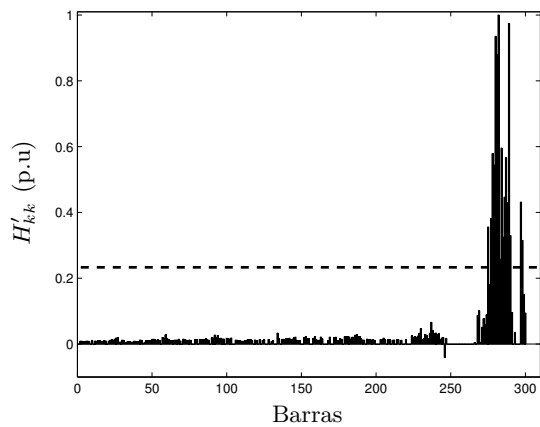
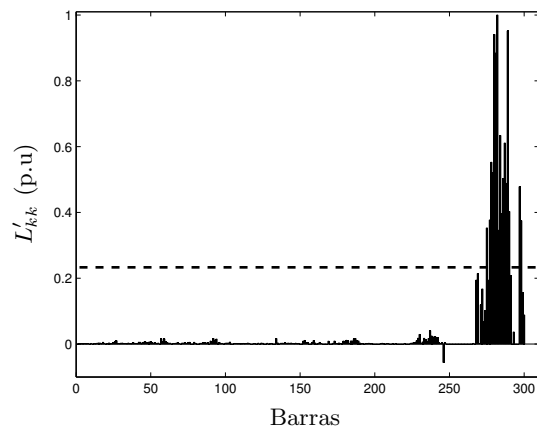
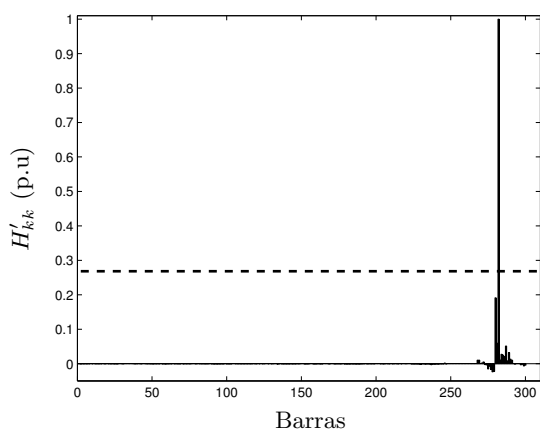
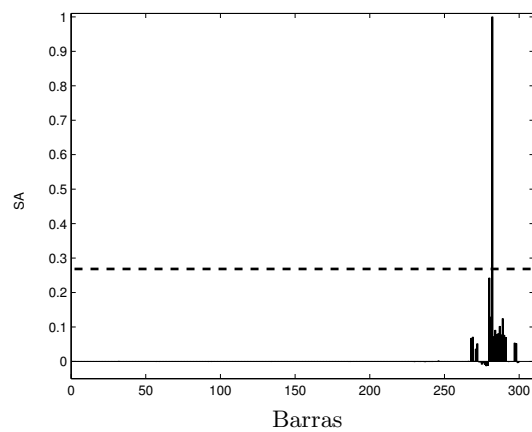
Figura 7.2:  $H'_{kk}$  CB (1)- 14 barrasFigura 7.3:  $L'_{kk}$  CB (1)- 14 BarrasFigura 7.4:  $H'_{kk}$  PMC (2) - 14 barrasFigura 7.5:  $L'_{kk}$  PMC (2) - 14 BarrasFigura 7.6:  $H'_{kk}$  PMC (3) - 14 barrasFigura 7.7:  $L'_{kk}$  PMC (3) - 14 Barras

Figura 7.8:  $H'_{kk}$  PMC (5) - 14 barrasFigura 7.9:  $L'_{kk}$  PMC (5) - 14 Barras

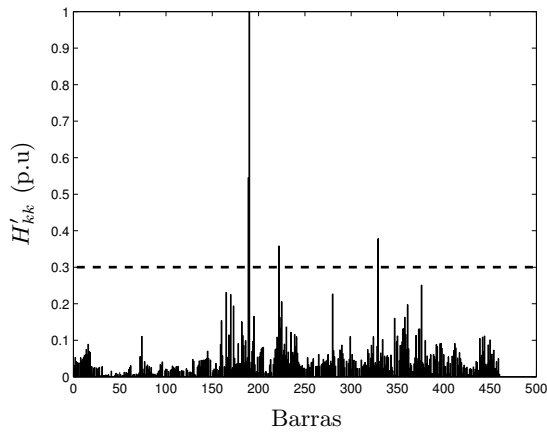
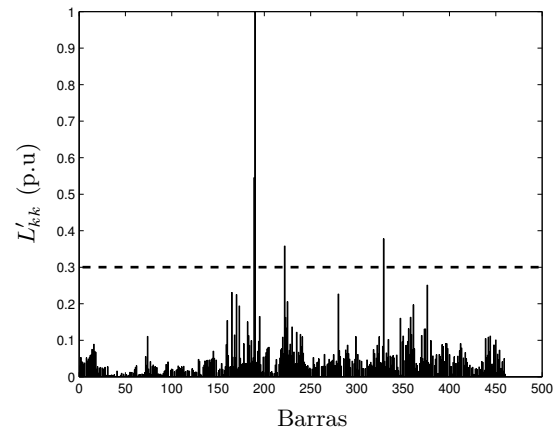
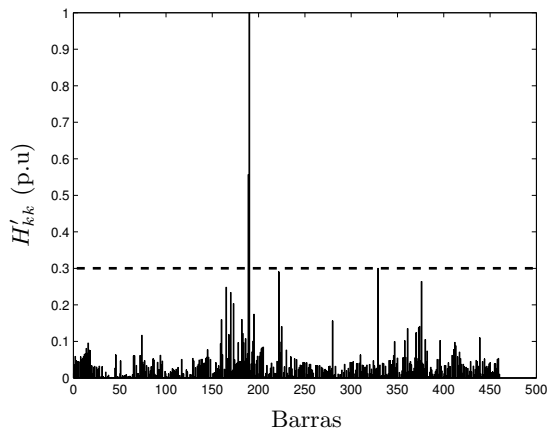
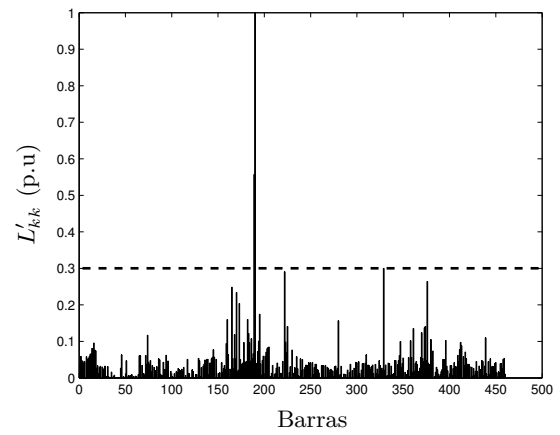
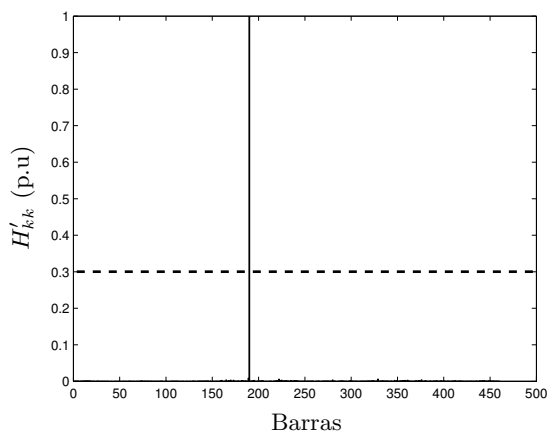
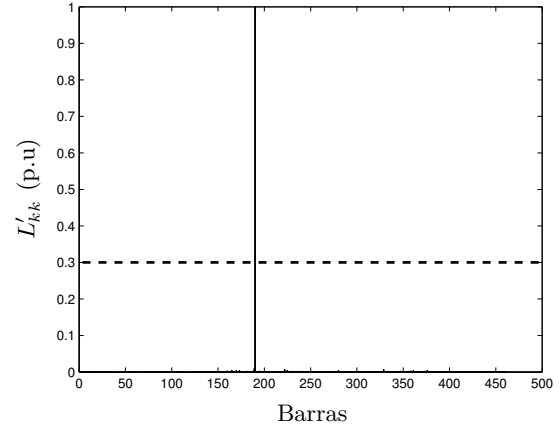
### Sensibilidades para a Rede IEEE 300 Barras

Figura 7.10:  $H'_{kk}$  CB (1) - 300 barrasFigura 7.11:  $L'_{kk}$  CB (1) - 300 BarrasFigura 7.12:  $H'_{kk}$  PMC (2) - 300 barrasFigura 7.13:  $L'_{kk}$  PMC (2) - 300 Barras



Figura 7.14:  $H'_{kk}$  PMC (3) - 300 barrasFigura 7.15:  $L'_{kk}$  PMC (3) - 300 BarrasFigura 7.16:  $H'_{kk}$  PMC (5) - 300 barrasFigura 7.17:  $L'_{kk}$  PMC (5) - 300 Barras

## Sensibilidades para o sistema Peruano - 460 Barras

Figura 7.18:  $H'kk$  CB (1) - Sistema PeruanoFigura 7.19:  $L'kk$  CB (1) - Sistema PeruanoFigura 7.20:  $H'kk$  PMC (2) - Sistema PeruanoFigura 7.21:  $L'kk$  PMC (2) - Sistema PeruanoFigura 7.22:  $H'kk$  PMC (5) - Sistema PeruanoFigura 7.23:  $L'kk$  PMC (5) - Sistema Peruano

## 7.4 Probabilidade de ocorrência do colapso de tensão

Nesta parte do trabalho é avaliada a probabilidade de ocorrência do colapso de tensão. A probabilidade é calculada como a relação entre o número de barras com sensibilidades acima de 30% e o número total de barras do sistema. Esta relação fornece uma idéia do impacto da área crítica no sistema em relação a estabilidade de tensão para diferentes pontos de operação. As Figuras 7.24 a 7.29 mostram esta probabilidade para diferentes sistemas IEEE 14, 30, 57, 300, sistemas reais, tais como o sistema Peruano de 460 barras e o sistema Brasileiro de 1081 barras. São avaliadas as barras que mais contribuem à perda de estabilidade de tensão, também são monitorados diferentes pontos de operação: o caso base corresponde ao ponto de operação (1), o PMC para uma direção de incremento de carga com fator de potência constante corresponde ao ponto de operação (2), o PMC para uma direção de incremento de carga avaliando o autovetor esquerdo corresponde ao ponto de operação (3), o PMC na direção subsequente ao ponto de operação (3) corresponde ao ponto de operação (4), finalmente o ponto de operação (5) corresponde ao PMC na direção da margem mínima. Para obter os diferentes pontos de operação podem ser usadas as metodologias apresentadas nos Capítulos 4-6. É possível notar que a probabilidade do colapso de tensão nas redes maiores e redes reais é muito baixa. Embora a situação seja crítica e o incremento de carga permissível nessa direção seja muito pequeno, as barras afetadas são poucas especialmente na direção da margem mínima Figuras 7.27 a 7.29.

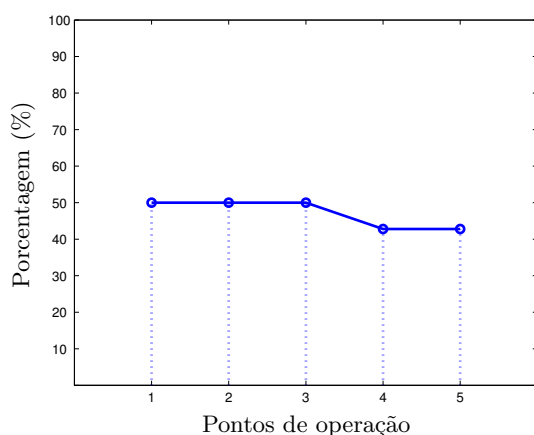


Figura 7.24: Probabilidade - rede 14 Barras

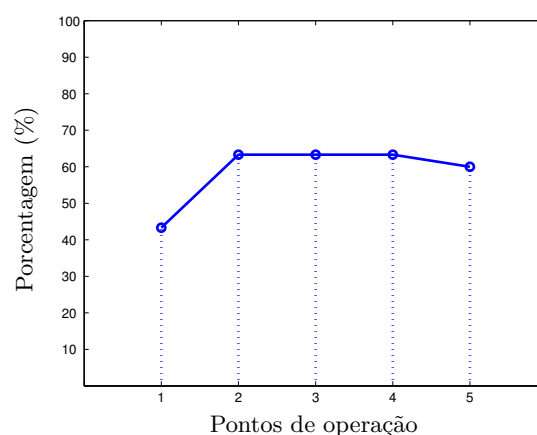


Figura 7.25: Probabilidade - rede 30 Barras

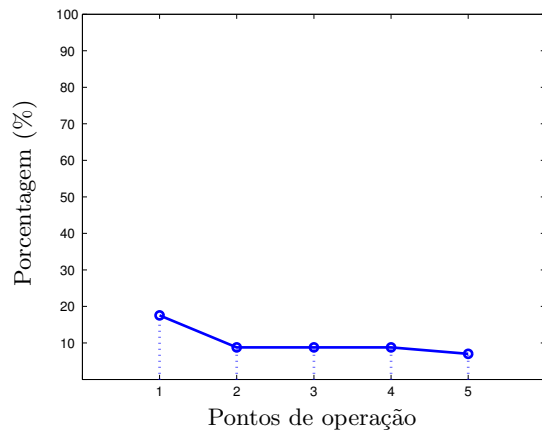


Figura 7.26: Probabilidade - rede 57 Barras

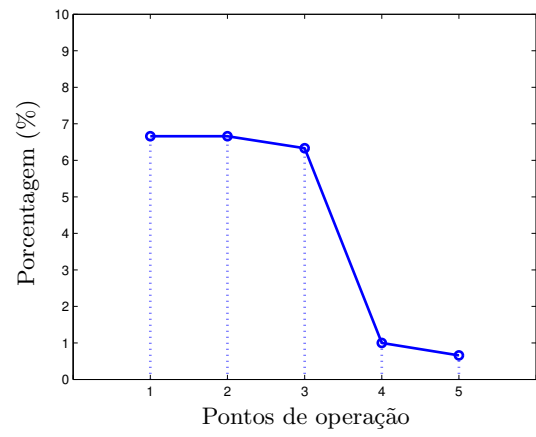


Figura 7.27: Probabilidade - rede 300 Barras

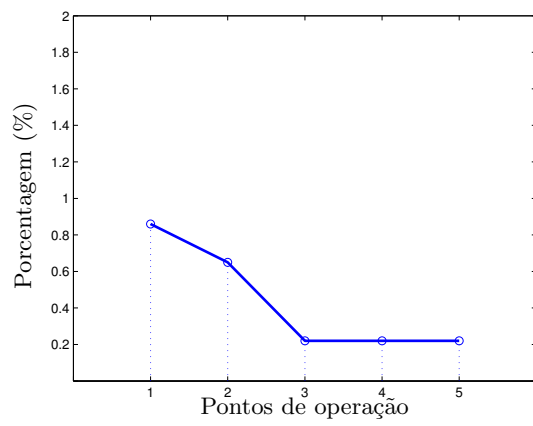


Figura 7.28: Probabilidade - Sistema Peruano - 460 barras

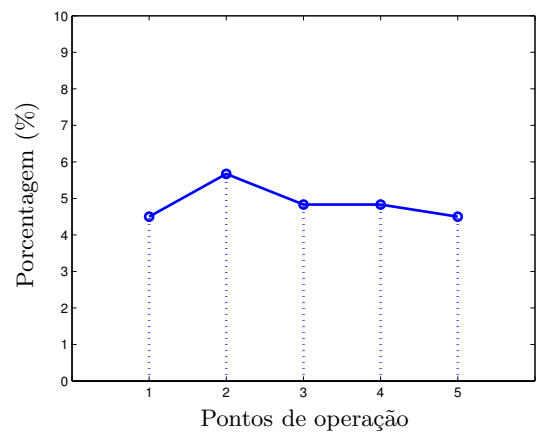


Figura 7.29: Probabilidade - Sistema Brasileiro - 1081 barras

## Capítulo 8

# Conclusões e considerações finais

### 8.1 Conclusões

Foram desenvolvidos vários métodos para obter a margem mínima de segurança de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência. Dentre as metodologias inicialmente desenvolvidas foram implementados dois métodos baseados na literatura. Uma das metodologias propostas (mantendo  $t$  constante e limitando o processo de incremento de carga  $\Delta\lambda$ ) como mostraram os resultados, apresenta uma redução importante no esforço computacional e permite calcular a margem mínima com eficiência e precisão para redes de pequeno e grande porte, redes com carga leve e com carga pesada e para redes reais entre outras.

Foram apresentadas duas abordagens para definir as direções de incremento de carga. A primeira segundo os requisitos das agências encarregadas do planejamento e da operação do sistema elétrico (para incremento de carga com fator de potência constante) e outra baseada na informação do autovetor esquerdo da matriz Jacobiana resultando esta última em um processo mais eficiente.

Os novos métodos propostos permitem encontrar os piores cenários de incremento de carga a partir de um ponto de operação definido. Este pior cenário de incremento de carga é fundamental no monitoramento dos sistemas de potência para evitar a perda de estabilidade ou colapso de tensão especialmente em redes muito carregadas para incrementos de carga súbitos ou não previstos.

O procedimento proposto na Seção 5.3 resultou em uma ferramenta rápida, precisa e eficiente para a análise de estabilidade de tensão, sendo apropriado para aplicações *on-line* tais como a operação, monitoramento e controle de sistemas elétricos de potência. Esta versão resultou em um método rápido devido ao menor número de iterações nos procedimentos tanto de incremento quanto de corte de carga. Escolher uma direção inicial de incremento de carga baseada no autovetor esquerdo é mais eficiente do ponto de vista computacional. Porém, é preciso calcular a margem e o ponto de máximo carregamento para incremento de carga com fator de potência constante para atender as necessidades das agências reguladoras.

A escolha da direção inicial de incremento de carga apenas tem influência no caminho para atingir a margem mínima. Demonstrou-se que para ambas direções escolhidas, fator de potência constante ( $\alpha=\beta=1$ ) e baseado no autovetor esquerdo ( $\alpha, \beta=\omega$ ), a margem obtida é a mesma. Alguma variação apresenta-se devido ao número de iterações no processo da obtenção da margem que é maior para o caso de fator de potência constante.

A importância do cálculo da margem mínima foi comprovada, visto que pequenos distúrbios

tais como incrementos de carga em uma direção imprevista, podem resultar em margens menores e podem ameaçar a operação do sistema em modo seguro. Nesta situação, o operador pode ter como referência uma margem maior somente para uma direção de incremento de carga. Outra importante característica da margem mínima é que no pior cenário de incremento de carga os MW podem ser incrementados em menor quantidade do que os MVar. Na prática, é o que realmente ocorre, pois usualmente os MW são os de maior influência no carregamento de um sistema de potência.

Os novos métodos propostos apresentam várias vantagens em relação a outros métodos tais como o método da continuação e outros métodos de otimização, pois a MSETm é calculada de maneira precisa e eficiente, prevenindo situações de divergência e número excessivo de iterações.

Como foi mostrado nas simulações de sistemas de pequeno e grande porte, sistemas IEEE e sistemas reais, o procedimento pode ser aplicado a qualquer tipo de rede. O procedimento também foi avaliado para situações de contingências. Este tipo de análise fornece informação crucial para prevenir/corrigir situações de emergência e colapsos de tensão.

## 8.2 Considerações finais

Uma nova proposta para encontrar a margem mínima está sendo explorada usando a análise de sensibilidade. Esta nova proposta permite encontrar a margem mínima ou pior cenário de incremento de carga de uma maneira muito eficiente sendo que o cálculo de autovetores e autovalores para definir a direção de incremento de carga não é necessário. Isto permite reduzir o esforço computacional e prevenir situações, tais como o cálculo de autovetores críticos no ponto de operação atual que não correspondam ao modo crítico no ponto de colapso de tensão. A direção de incremento de carga é definida aproveitando a atividade, tanto ativa quanto reativa medida pelas sensibilidades no caso base, avaliando a informação fornecida pela diagonal da matriz Jacobiana do fluxo de carga. Os resultados iniciais são animadores, e mais testes devem ser feitos em redes maiores, reais e de grande porte.

A análise de sensibilidade permite fazer um estudo das áreas críticas com muita eficiência, pois no caso base já é capturado um espectro que permite identificar as áreas e/ou barras críticas que mais contribuem à perda de estabilidade. Estas piores barras em geral correspondem às barras críticas nos PMC para diferentes direções de incremento de carga. Com esta informação não é necessário calcular a margem mínima para determinar as barras que poderiam contribuir a esse pior cenário de incremento de carga, porque desde o caso base pode ser obtida essa informação. Embora a probabilidade de ocorrência do colapso seja baixa, é importante ter o valor numérico da margem no monitoramento da distância ao ponto de colapso de tensão.

Deve-se estudar com maior detalhe o procedimento de corte de carga, pois em alguns casos o procedimento fica muito conservador reduzindo drasticamente a eficiência do método, especialmente nos casos em que a fronteira de factibilidade é muito irregular.

Finalmente, deve-se implementar a metodologia em uma linguagem e paradigma de programação que permita fazer uma análise da potencialidade do método para aplicações em tempo real.

# Referências Bibliográficas

- [1] P. Kundur, **Power system stability and control**, McGraw-Hill, 1994.
- [2] IEEE/CIGRE, Definition and classification of power system stability, Joint task force on stability terms and definitions, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19 no.2, 2004.
- [3] C. Cañizares, Conditions for saddle-node bifurcations in AC/DC power systems, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 17, no. 1, 1995.
- [4] T. Van Cutsem and C. Moisse and R. Maillhot, Determination of secure operating limits with respect to voltage collapse, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, 1999.
- [5] C. Cañizares, A. C. Z. Souza and V. Quintana, Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 3, 1996.
- [6] P. A. Löf, G. Andersson, D. J. Hill, Voltage stability indices for stressed power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 1, 1997.
- [7] V. Ajjarapu, C. Christy, The Continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, 1992.
- [8] L. M. C. Braz, C. A. Castro, C. A. F. Murari, A critical evaluation of step size optimization based load flow methods, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 1, 2000.
- [9] L. A. L. Zarate, C. A. Castro, J. L. M. Ramos, E. R. Ramos, Fast computation of voltage stability security margins using nonlinear programming techniques, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 1, 2006.
- [10] Operador Nacional do Sistema Brasileiro (ONS), Procedimentos de rede: sugestões e critérios para estudos elétricos, Submódulo 23.3, Disponível em: <http://www.ons.org.br/ons/procedimientos/index.html>, Relatório técnico.
- [11] Western Electricity Coordinating Council (WECC), Voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology, Final report, Disponível em: <http://www.wecc.biz/main.html>.
- [12] I. Dobson, H. D. Chiang, Towards a theory of voltage collapse in electric power systems. *Systems and control letters*, vol 13, no. 4, 1989.
- [13] I. Dobson, Observations on the geometry of saddle node bifurcation and voltage collapse in electrical power systems. *IEEE Transactions Circuits and Systems*, vol. 39, no. 3, 1992.
- [14] T. J. Overbye, A power flow measure for unsolvable cases, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 3, 1994.

- [15] Y. Mansour (Ed.), Suggested techniques for voltage stability analysis, *IEEE, 93TH0620-5PWR*, 1993.
- [16] I. Dobson, L. Lu., New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 3, 1993.
- [17] F. Alvarado, I. Dobson, Y. Hu, Computation of closest bifurcations in power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 2, 1994.
- [18] C. A. Cañizares, Calculating optimal system parameters to maximize the distance to saddle-node bifurcations, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 45, no. 3, 1998.
- [19] I. Dobson, L. Lu., Y. Hu. A direct method for computing a closest saddle node bifurcation in the load power parameter space of an electric power system , *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 1991.
- [20] Arquivo com sistemas de potência modelos IEEE, Disponível em: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- [21] Iwamoto, S.; Tamura, Y., A load flow calculation method for ill-conditioned power systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 4, 1981.
- [22] Tate, J.E.; Overbye, T.J., A comparison of the optimal multiplier in polar and rectangular coordinates, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 4, 2005.
- [23] L. A. L. Zarate, (C. A. Castro - Orientador), Estimaco rápida do ponto de máximo carregamento para a análise de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência, Tese de doutorado, DSEE/FEEC/UNICAMP, 2004.
- [24] I. Kopcak, L. C. P. da Silva, J. S. Naturesa, Transmission systems congestion managment by using modal participation factors. *2003 IEEE Bologna Powertech Conference*, Bologna, Italy, 23-26 June, 2003.
- [25] Y. Mansour, W. Xu, F. Alvarado, C. Rinzin, SVC placement using critical modes of voltage stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 2, 1994.
- [26] L.C.P. da Silva, V.F. da Costa, W. Xu. Preliminary results on improving the modal analysis technique for voltage stability assessment. *Power Engineering Society Summer Meeting 2000*, vol 3, 16-20 July, 2000.



## Apêndice A

# Publicações resultantes do trabalho de pesquisa

### Artigos publicados

D. B. Bedoya, C. A. Castro, Computation of Power Systems Minimum Voltage Stability Security Margins, *POWERCON 2006 International Conference on Power System Technology*, Chongqing, China, 22-26 October, 2006.

### Artigos aceitos para publicação

D. B. Bedoya, M. F. Bedriñana, C. A. Castro, Obtenção da margem mínima de sistemas elétricos de potência, *XIX SNPTEE 2007, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro Brasil, 14-17 outubro 2007.

M. F. Bedriñana, D. B. Bedoya, C. A. Castro, An hybrid method for computing maximum loading point using non linear programming techniques and continuation load flow, *POWERTECH 2007* 1 - 5 July 2007, Lausanne, Switzerland.

### Artigos submetidos para publicação

D. B. Bedoya, C.A. Castro., L.C da Silva, A Method for Computing Minimum Voltage Stability Margins of Power Systems, *IET Generation, Transmission & Distribution*.

### Trabalhos apresentados em outros eventos

Duvier Bedoya, Carlos Castro. Obtenção da margem mínima de estabilidade de tensão em sistemas de potência. *Sispot 2006 - Encontro de Pesquisadores em Sistemas de Potência*, 10-12 abril de 2006. UNICAMP / FEEC, Campinas Brasil.

Duvier Bedoya, Carlos Castro. Um método eficiente para identificar as áreas críticas em sistemas de potência. *Sispot 2007 - Encontro de Pesquisadores em Sistemas de Potência*, 02-04 abril de 2007. UNICAMP / FEEC, Campinas Brasil.

Duvier Bedoya, Carlos Castro, Manfred Bedriñana. Um novo método para obter a margem mínima de segurança de sistemas de potência. *Sispot 2007 - Encontro de Pesquisadores em Sistemas de Potência*, 02-04 abril de 2007. UNICAMP / FEEC, Campinas Brasil.

Manfred Bedriñana, Duvier Bedoya, Carlos Castro. Método híbrido para o cálculo do ponto de máximo carregamento usando o fluxo de carga da continuação e técnicas de programação não-linear. *Sispot 2007 - Encontro de Pesquisadores em Sistemas de Potência*, 02-04 abril de 2007. UNICAMP / FEEC, Campinas Brasil.

Manfred Bedriñana, Carlos Castro, Duvier Bedoya. Caracterização da fronteira próxima ao ponto de máximo carregamento baseado em fluxo de carga com otimização de passo. *Sispot 2007 - Encontro de Pesquisadores em Sistemas de Potência*, 02-04 abril de 2007. UNICAMP / FEEC, Campinas Brasil.